

Taajuusmuuttajan virranmittaus magneettipiirittömällä Hall-anturilla

Tuomas Karhunen

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 3.8.2016.

Työn valvoja:

Prof. Jorma Kyyrä

Työn ohjaaja:

DI Marco Lämsä



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Tuomas Karhunen		
Työn nimi: Taajuusmuuttajan virranmittaus magneettipiirittömällä Hall-anturilla		
Päivämäärä: 3.8.2016	Kieli: suomi	Sivumäärä: 9 + 57
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professuuri: S3016 Sähkökäytöt		
Työn valvoja: Prof. Jorma Kyyrä, Aalto-yliopisto		
Työn Ohjaaja: DI Marco Lämsä, ABB Oy		
<p>Tässä työssä tutkitaan magneettipiirittömän Hall-anturin soveltuvuutta virranmittaukseen taajuusmuuttajakäytöissä. Tavoite on suunnitella kaupallisten kompensoitujen Hall-anturien kanssa yhteensopiva virta-anturi, joka perustuu magneettivuon tiheyden mittaukseen ilman vuota keskittävää magneettipiiriä. Työssä esitellään aluksi yleisesti taajuusmuuttaja ja sen virranmittauksen vaatimuksia. Myös muita virranmittausmenetelmiä käsitellään, mutta pääpaino on Hall-ilmiöön perustuvissa antureissa. Sähkömagnetismia ja Hall-ilmiötä esitellään pohjustukseksi virta-anturin suunnittelua varten. Virta-anturi suunnitellaan piirikortille, koska se tarvitsee signaalinkäsittelyelektroniikan ollakseen yhteensopiva tyypillisten kompensoitujen Hall-antureiden kanssa.</p> <p>Valmiilla virta-anturilla tehdään staattisen ja dynaamisen suorituskyvyn mittauksia sen tarkkuuden selvittämiseksi. Myös ulkoisten magneettikenttien ylikuulumista ja niiden suodatusta tutkitaan. Samat suorituskymittaukset tehdään vertailun vuoksi erälle kaupalliselle kompensoidulle Hall-anturille. Mittaukset osoittavat, että itse suunniteltu magneettipiiritön Hall-anturi on kompensoitua Hall-anturia epätarkempi, dynaamisilta ominaisuuksiltaan huonompi ja herkempi ylikuulumiselle. Ylikuulumista kuitenkin saadaan suodatettua tehokkaasti koteloinnilla. Myös tarkkuutta voisi todennäköisesti parantaa jatkamalla kortin kehitystä.</p> <p>Antureiden käyttö vaihtosuuntaajassa osoittaa, että dynaamiset ominaisuudet ja ylikuulumisen suodatus koteloinnilla ovat riittäviä taajuusmuuttajakäyttöön. Magneettipiiritön Hall-anturi on myös huomattavasti pienempi ja halvempi kuin kompensoitu Hall-anturi. Sillä olisi siis potentiaalia korvata suuret ja kalliit kompensoidut Hall-anturit.</p>		
Avainsanat: Hall-anturi, virranmittaus, virta-anturi, taajuusmuuttaja, magneettipiiritön		

Author: Tuomas Karhunen		
Title: Current Measurement of Frequency Converter With Coreless Hall-sensor		
Date: 3.8.2016	Language: Finnish	Number of pages: 9 + 57
Department of Electrical Engineering and Automation		
Professorship: S3016 Electric Drives		
Supervisor: Prof. Jorma Kyyrä, Aalto University		
Advisor: M.Sc. (Tech.) Marco Lämsä, ABB Oy		
<p>The purpose of this thesis is to investigate the applicability of coreless Hall-sensor as a current transducer of frequency converter. Aim is to design a Hall effect current transducer without a magnetic field concentrating magnetic core. Moreover, it must be compatible with typical closed loop Hall-sensors. In the beginning a frequency converter and its current measurement requirements are introduced. Also other current sensing techniques are discussed. However, the focus is at Hall effect based current sensors. Basics of electromagnetism and Hall effect are explained to understand the dimensioning of the transducer. The current transducer is designed on a PCB because it needs signal processing electronics to achieve the compatibility with typical closed loop Hall-sensors.</p> <p>The designed current transducers statical and dynamical performance is tested to determine the accuracy. Also crosstalk and filtering of external magnetic field is investigated. For comparison the same tests are done with one commercial closed loop Hall-sensor. Tests indicate that the coreless Hall-sensor is not so accurate, dynamically worse and more sensitive to crosstalk, compared to closed loop Hall-sensor. However, the crosstalk can be significantly reduced with shielding the transducer, while the accuracy could be probably improved by further development of the transducer.</p> <p>Regardless of inferior performance of the coreless Hall-sensor, it is proved that the dynamical performance and crosstalk are not problems of coreless Hall-sensor in inverter application. Moreover, the coreless Hall-sensor is significantly smaller and cheaper than closed loop Hall-sensor. Therefore, it would have potential to replace bulky and expensive closed loop Hall-sensors.</p>		
Keywords: Hall-sensor, current measurement, current transducer, frequency converter, coreless		

Esipuhe

Haluan kiittää kaikkia diplomityössäni minua auttaneita työkavereita ABB Oy Drives-yksikössä. Kiinnostavasta aiheesta kiitän Anssi Kämäriä ja hyvästä ohjauksesta Marco Lämsää. Kiitos myös niille työkavereille, jotka autoitte virheiden etsinnässä ja mittausten teossa. Haluan kiittää myös työni valvojaa Professori Jorma Kyyrää asiantuntevasta palautteesta.

Espoossa 3.8.2016

Tuomas Karhunen

Sisällysluettelo

Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet.....	vii
1 Johdanto	1
2 Sähkökäytöt.....	2
2.1 Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja	2
2.1.1 Tasasuuntaaja.....	3
2.1.2 Vaihtosuuntaaja.....	4
2.2 Sähkökäyttöjen ohjaus.....	5
2.3 Virtatiedon käyttö taajuusmuuttajassa.....	7
2.4 Virtatiedon virheen vaikutus vääntömomenttiin ja pyörimisnopeuteen.....	10
3 Hall-ilmio ja virranmittausmenetelmät	12
3.1 Sähkömagnetismi ja Hall-ilmio	12
3.2 Hall-anturi.....	14
3.3 Virranmittausmenetelmät	15
3.3.1 Virranmittausmenetelmien suorituskyky ja vaatimukset	16
3.3.2 Virta-anturit	19
3.4 Sähkömagneettiset häiriöt.....	22
3.4.1 Ulkoisten magneettikenttien vaimennus	23
3.4.2 Virranahto.....	24
4 Virranmittaus magneettipiirittömällä Hall-anturilla	25
4.1 Sensorin identifiointi	25
4.2 Anturin sijoittaminen virtakiskon ympärille.....	25
4.3 Allegro A1366 –sensorin suorituskyky ja vaatimukset.....	28
4.4 Signaalinkäsittelypiirin suunnittelu.....	29
5 Mittaukset.....	35
5.1 Vertailtavat virta-anturit	35
5.2 Nollapistepoikkeama	35
5.3 Vahvistusvirhe	39
5.4 Oikosulkutestit	41
5.5 Ylikuuluminen	43
5.6 Antureiden käyttö vaihtosuuntaajassa	46
5.7 Mittausten yhteenveto	47
6 Yhteenveto	49
Lähdeluettelo.....	51
Liite A.....	53

Liite B	54
---------------	----

Symbolit ja lyhenteet

\hat{R}_s	Staattoriresistanssin estimaatti
\hat{T}_e	Vääntömomentin estimaatti
$\hat{\theta}_{\psi_s}$	Vuonkulman estimaatti
$\hat{\tau}_e$	Vääntömomentin estimaatti
$\hat{\psi}_s$	Staattorivuon estimaatti
$\hat{\omega}_r$	Roottorin sähkökulmanopeuden estimaatti
$\hat{\psi}_s^s$	Staattorivuon estimaatti staattorikoordinaatistossa
A_p	Johtimen poikkipinta-ala
R, R_{kuorma}, R_f	Vastus, kuormavastus, takaisinkytkentävastus
$\Delta i_U, \Delta i_V$	U- ja V-vaiheiden virtojen nollapistepoikkeamat
\mathbf{i}_s^s	Virtavektori staattorikoordinaatistossa
\mathbf{v}_s^s	Jännitevektori staattorikoordinaatistossa
$\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4, \mathbf{v}_5, \mathbf{v}_6$	Vaihtosuuntaajan jännitevektoreita
I_a	Virta-alkio suuruus
I_C	Hall-anturin herätevirta
I_{os}	Kokonaisnollapistepoikkeama
I_{osG1}, I_{osG2}	Vahvistinasteiden 1 ja 2 aiheuttamat nollapistepoikkeamat
I_{osHall}	Hall-antureiden tuottama nollapistepoikkeama
I_{osOA}	Operaatiovahvistimen sisääntulopoikkeaman aiheuttama nollapistepoikkeama
I_{out}	Virta-anturin ulostulosignaali
I_p	Ensiövirta
I_{error}	Virta-anturin virhe ampeereissa
L_σ	Hajainduktanssi
R_s	Staattoriresistanssi
R_m	Virta-anturin toisiovirran sunttivastus
R_{shunt}	Sunttivastus vahvistusvirhemittauksissa
T_e	Vääntömomentti
$U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$	Vaihtosuuntaajan jännitevektoreita
U_{DC}	Välipiirin jännite
U_{diff}	Eromuotoisen vahvistimen tulojännitteiden ero
U_{meas}	Mittausvastuksen jännite
U_{Rm}	Virta-anturin toisiovirran sunttivastuksen jännite
U_{shunt}	Sunttivastuksen jännite
V_H, V_s	Hall-jännite, piin Hall-jännite
d_ψ	DTC-säätömenetelmän kytkentälogiikan vuotieto
i_{sd}, i_{sq}	Staattorivirran d- ja q-komponentit

i_{sU}, i_{sV}, i_{sW}	Staatton vaihevirrat
i_U	U-vaiheen virta
k_U, k_V	U- ja V-vaiheiden virtojen vahvistusvirheet
q_0	Varauksen voimakkuus
$u_{DC-}, DC -$	Välipiirin negatiivinen jännite
$u_{DC+}, DC +$	Välipiirin positiivinen jännite
y_a, x_a	Hall-anturin koordinaatit
y_k, x_k	Kiskon virta-alkio koordinaatit
$\mathbf{B}_{tot}, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_H$	Kokonais-, eräs-, hajamagneettivuon tiheys
\mathbf{F}_L	Lorentzin voima
\mathbf{u}_s^s	Staattonijännite staattonikoordinaatistossa
θ_{ψ_R}	Roottorivuon kulma
θ_{ψ_s}	Staattonivuon kulma
τ_{ref}	Vääntömomentin referenssi
ψ_R	Roottorivuon voimakkuus
ψ_s	Staattonivuon voimakkuus
ψ_s^{ref}	Staattonivuon referenssiarvo
ψ_{PM}	Kestomagneettien tuottama vuo
ω_{ref}	Sähkökulmanopeuden referenssiarvo
ω_r, ω_1	Roottorin sähkökulmanopeus
ϵ_r, ϵ_0	Suhteellinen permittiivisyys, tyhjiön permittiivisyys
ψ_R^s	Roottorivuo staattonikoordinaatistossa
ψ_s^s, ψ_{s0}^s	Staattonivuo ja staattonivuon alkuarvo staattonikoordinaatistossa
μ, μ_0, μ_r	Permeabiliteetti, tyhjiön permeabiliteetti, suhteellinen permeabiliteetti
A	Johdinten päällekkäin oleva pinta-ala
C	Kapasitanssi
D	Tunkeutumisvyvyys
d	Johdinten etäisyys toisistaan
\mathbf{E}, E	Sähkökenttä, sähkökentän voimakkuus
f	Taajuus
G	Gaussi
$G1, G2, G3$	Operaatiovahvistimen vahvistus
\mathbf{H}	Magneettikenttä
j	Imaginaariyksikkö
J	Virrantiheys
N, N_c, N_s	Varaustenkuljettajien tiheys, kuparilla, piillä
r	Säde
S	Pinta-ala

t	Aika
T	Tesla
U, V, W	Moottorin lähtövaiheet U, V, W
w	Johtimen leveys
\mathbf{v}, v	Nopeusvektori, nopeus
Γ	Suljettu polku
ΔT_e	Vääntömomentin sykkeisyys
$\Delta\psi$	Vuosäädön vuon hystereesiraja
Ω	Ohmi
A	Johtimen poikkipinta-ala
I, \mathbf{I}	Virta, virtavektori
p	Moottorin napapariluku
$sens_{BNEG}$	Anturin näyttämän muutos negatiivisella magneettivuontiheydellä
$sens_{BPOS}$	Anturin näyttämän muutos positiivisella magneettivuontiheydellä
sym_{ERR}	Anturin symmetrisyysvirhe
\mathbf{B}, B	Magneettivuontiheys, magneettivuontiheyden voimakkuus
α	Tasasuuntaussillan ohjauskulma
β	Magneettivuon tiheyden suunnan ja Hall-anturin välinen kulma
θ	Sähköjakson kulma
ρ	Johtimen resistiivisyys
A/D-muunnin	Analogia-digitaalimuunnin
CLCE-01	Työssä suunniteltu magneettipiiritön Hall-anturi virranmittaukseen (Closed Loop Current Emulator)
DC	Tasavirta (Direct current)
DTC	Suora momenttisäätö (Direct Torque Control)
IGBT	Bipolaaritransistori eristetyllä hilalla (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MOSFET	Pintakanavatransistori (Metal-Oxide-Silicon-Field-Effect-Transistor)
ppm/°C	Miljoonasosaa per Celsiusaste (parts per million per degree Centigrade)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
SIP	Elektroniikan komponenttien kotelotyyppi (Single in-line package)

1 Johdanto

Virranmittaus on yksi keskeisistä toiminnoista suorituskkyisissä sähkökäytöissä. Varsinkin vaihtosuuntaajan virtojen tarkka mittaaminen on moottorin ohjauksen kannalta erittäin tärkeää. Virranmittausmenetelmät voivat perustua Ohmin lakiin, Faradayn induktiolakiin tai magneettikentän mittaukseen. Ohmin lakiin perustuvissa tavoissa virta johdetaan jonkin tunnetun vastuksen läpi ja sen yli syntyvä jännitehäviö mitataan. Suurilla virroilla vastuksessa syntyy paljon häviöitä. Lisäksi menetelmä vaikuttaa suhteellisen paljon piirin toimintaan. Faradayn induktiolakiin perustuvat menetelmät eivät juurikaan vaikuta mitattavaan piiriin, mutta ne kykenevät mittaamaan vain vaihtovirtaa. Virran synnyttämän magneettikentän mittaukseen perustuvissa tekniikoissa yhdistyvät hyvät puolet edellä mainituista tekniikoista. Niissä taajuuskaista alkaa tasavirrasta, ja ne eivät vaikuta juurikaan mitattavaan piiriin, eivätkä tuota suurta tehohäviötä.

Hall-ilmiöön perustuvat Hall-anturit ovat yksi tapa mitata virran tuottamaa magneettivuontiheyttä. Tässä työssä tavoite on suunnitella taajuusmuuttajan virranmittaukseen magneetti-piiritön Hall-anturi, joka olisi yhteensopiva kaupallisten kompensoitujen Hall-antureiden kanssa. Kompensoidut Hall-anturit ovat yleisesti suorituskkyvyltään todella hyviä, mutta ne ovat magneetti-piirin ja kompensointikäsitelmän takia suuria ja siksi myös kalliita. Työn tavoitteena on saavuttaa kompensoitua Hall-anturia vastaava suorituskky huomattavasti halvemmalla tekniikalla.

Työn toisessa luvussa käydään läpi sähkökäyttöjä yleisellä tasolla, jonka jälkeen esitellään niiden virranmittauksen vaatimuksia. Kolmannessa luvussa käsitellään sähkömagnetismia ja Hall-ilmiötä, jotta saadaan perusta virranmittauskortin suunnittelulle. Myös muita virranmittausmenetelmiä esitellään pintapuolisesti, mutta pääpaino on Hall-ilmiöön perustuvissa menetelmissä. Lisäksi anturiin kohdistuvia häiriöitä ja niiden suodatusta käsitellään.

Hall-anturipiirien mittasignaali on yleensä jännitesignaali. Teollisuussovelluksissa yleisesti käytettävien suurivirtaisten kompensoitujen Hall-anturien mittasignaali kuitenkin tulee yleensä virtana ulos anturilta. Näin ollen työssä suunniteltavan virta-anturin jännitesignaali on muutettava virtasignaaliksi. Sitä varten työssä suunnitellaan neljännessä luvussa signaalinkäsittelyelektroniikka Hall-anturipiirien kanssa samalle piirikortille.

Viidennessä luvussa tehdään valmiille virranmittauskortille sekä staattisen, että dynaamisen suorituskkyyn testejä. Magneetti-piiritön Hall-anturi on lähtökohtaisesti erittäin herkkä ulkoisten magneettikenttien aiheuttamalle häiriölle. Kompensoiduissa Hall-antureissa ulkoiset magneettikentät häiritsevät vähemmän, koska magneetti-piiri keskittää vuon Hall-anturipiirille. Sen takia myös ulkoisten häiriöiden sietokkyä tutkitaan. Lisäksi esitetään kuinka ulkoisia magneettikenttiä voidaan tehokkaasti suodattaa. Vertailun vuoksi samat testit tehdään myös erälle kaupalliselle kompensoidulle Hall-anturille.

2 Sähkökäytöt

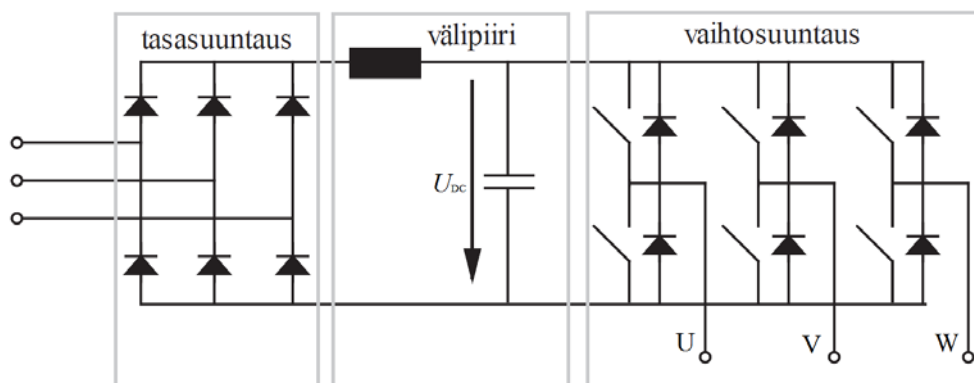
Sähkökäyttö tarkoittaa laitetta, joka muuntaa syöttöverkosta saatavaa sähköenergiaa prosessissa vaadittavaksi hyötytyöksi. Sähkökäyttöön kuuluu yleensä yksi tai useampi muuttaja sekä moottori. [1] Muuttajat ohjaavat moottoria ja moottori muuttaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Työkone muuttaa moottorin mekaanisen energian sovelluksesta riippuen esimerkiksi potentiaalienergiaksi tai liike-energiaksi.

Muuttajat muuttavat nimensä mukaisesti sähköenergiaa eri muotoihin. Muunnos tehdään puolijohdekytkimillä katkomalla syöttöverkon sähköä. Erilaisia muuttajia ovat vaihtosuuntaajat, tasasuuntaajat ja tasasähkökatkojat. Tässä työssä tutkitaan jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan virranmittausanturin toteutusta. Välipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan yhdistelmästä. Niiden välissä on tasasähkövarastona joko kondensaattori tai kuristin. Muita välipiirillisiä taajuusmuuttajia ovat kuormakommutoitu taajuusmuuttaja ja virtavälipiiritaajuusmuuttaja. Näiden lisäksi on matriisimuuttajia ja syklokonverttereita, jotka ovat suoria taajuusmuuttajia, eli niillä ei ole tasasähkövarastoa. Matriisimuuttajassa syöttöverkon tulovaiheet kytketään suoraan moottorin vaiheisiin yhdeksällä puolijohdekytkimellä. Matriisimuuttajia ei kuitenkaan ole juurikaan kaupallisesti saatavilla, koska puolijohdekytkimet tarvitsevat todella suurta suorituskkyä. Lisäksi sen vaatimat suodattimet vastaavat kooltaan välipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirin komponentteja. Toistaiseksi ainoa suora taajuusmuuttaja, joka on tehty kaupallisesti, on syklokonvertteri. Sekin on käytännöllinen ratkaisu vain suurilla, yli megawatin tehoilla suurimman mahdollisen lähtötaajuuden ollessa alle puolet syöttöverkon taajuudesta. [1]

Sähkökäyttöjen virranmittausanturit perustuvat joko sunttivastukseen tai Hall-anturiin. Sunttivastus kytketään sarjaan esimerkiksi vaihtosuuntaajan lähtövaiheeseen, jolloin mitattava virta kulkee vastuksen läpi. Vastuksen yli muodostuu luonnollisesti jännite, joka on suoraan verrannollinen virtaan. Tätä jännitettä voidaan käyttää virtatietona. Hall-antureilla sen sijaan mitataan johtimen ympärille syntyvää magneettivuontiheyttä. Hall-anturin lävistävä magneettivuontiheys poikkeuttaa Hall-elementillä elektroneja niin, että elementille muodostuu mitattavaan virtaan verrannollinen jännite. Tätä Hall-jännitettä voidaan käyttää sähkökäytön virtatietona. [1]

2.1 Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja

Jännitevälipiiritaajuusmuuttajan pääpiiri voidaan kuvan 1 mukaisesti jakaa kolmeen eri osaan: tasasuuntaajaan, välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan. Välipiirin toteutukseen ei ole paljoakaan toisistaan eroavia topologioita. Syöttöverkkona on yleensä 3-vaihe verkko. Tasasuunnattua virtaa voidaan ensin tasoittaa kuvan mukaisesti kuristimella ja energia varastoidaan suureen välipiirikondensaattoriin. Välipiirikondensaattori on monesti elektrolyyttikondensaattori, koska se on energiatihedeltään hyvä verrattuna muihin kondensaattorityyppeihin. Tasa- ja vaihtosuuntaajille on kuitenkin useampi erilainen toteutustapa. Eroina ovat kytkiminä toimivat erilaiset tehopuolijohdekomponentit.



Kuva 1: Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja. (muokattu lähteestä [2])

2.1.1 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajat voidaan jakaa itsekommutoiviin ja verkkokommutoiviin tasasuuntaajiin. Nimitykset tulevat siitä, että itsekommutoivan suuntaajan kytkimistä vähintäänkin osan tai kaikki voi sammuttaa minä hetkenä hyvänsä. [2] Verkkokommutoivan tasasuuntaajan tyristorit tai diodit sen sijaan sammuvat aina niiden virran katketessa. Yksinkertaisin verkkokommutoiva tasasuuntaaja voidaan tehdä diodeilla. Kun jännite diodin anodilla on noin voltin suurempi kuin katodilla, alkaa se johtaa. Kuvan 1 tasasuuntausosiossa syöttöverkon virta siirtyy, eli kommutoituu, vaakatasossa vierekkäin olevien diodien välillä verkkojännitteen mukaan. Johtotilassa on aina se diodi, jonka vaihejännite on suurin. Diodia ei siis pysty ohjaamaan sammuksiin tai päälle, ja ne voivat johtaa vain yhteen suuntaan. Hyvää diodisillassa on tehokerroin, eli jännitteen ja virran vaihe-ero on pieni. Ne ovat myös yksinkertaisia, koska eivät tarvitse erillistä ohjausta. Toisaalta ohjaamattomuus on toisinaan huono ominaisuus, jos esimerkiksi tasasuunnattua jännitettä haluttaisiin säätää. Se ei diodisillalla onnistu, vaan jännite on aina riippuvainen vain syöttöverkon jännitteestä. Kuvan 1 kuusipulssitasasuuntaajan tapauksessa tasajännite saadaan yhtälön:

$$U_{DC} = \frac{3 * \sqrt{2}}{\pi} U \cos(\alpha) \quad (1)$$

mukaisesti, missä U on vaiheiden välisen pääjännitteen tehollisarvo ja ohjauskulma α on diodisillan tapauksessa nolla.

Myös tyristorit ovat verkkokommutoivia, mutta ne sytytetään erillisellä ohjaussignaali. Syttymisen ehto on sama kuin diodilla eli anodijännitteen on oltava korkeampi kuin katodijännite, ja lisäksi hilalle on annettava ohjaus. Ohjauksen on oltava vähintään noin 20 – 30 μ s pituinen sytytysvirtapulssi. [1] Tyristori pysyy johtavana niin pitkään kuin sen läpi kulkee virtaa. Sattumisen jälkeen se tarvitsee uuden sytytysvirtapulssin alkaakseen taas johtaa.

Tyristorisillan hyvä puoli tasasuuntaajana on mahdollisuus myöhästyttää sytytystä, eli säätää ohjauskulmaa α . Myös kuusipulssiselle tyristorisillalle pätee sama tasasuunnatun jännitteen yhtälö kuin diodisillalle sillä erotuksella, että nyt ohjauskulma α on säädettävissä. Jos käytetään ohjauskulmaa nolla, toimii tyristorisilta samalla tavalla kuin diodisilta, eli tyristori, jolla on korkein vaihejännite, johtaa. Ohjauskulmaa α suurentamalla voidaan myöhästyttää sytytystä niin, että tasasuunnattu jännite saadaan säädettyä nolnaan saakka ja jopa negatiiviseksi, jos ohjauskulmaa suurennetaan yli 90 asteen. Nolla voltia voidaan saavuttaa sijoittamalla yhtälöön (1) ohjauskulmaksi 90°. [1]

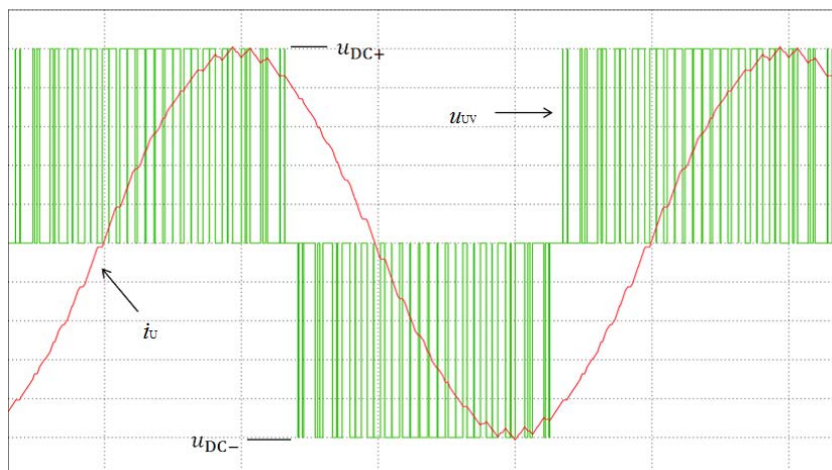
Edellisillä ratkaisuilla ei kuitenkaan voida syöttää tehoa vastakkaissuuntaisesti syöttöverkkoon päin, koska virta voi kulkea tyristorissa ja diodeissa vain yhteen suuntaan. Jokaiselle tyristorille voi kuitenkin lisätä rinnalle toisinpäin kytketyn tyristorin, jolloin virta voi kulkea myös verkkoon päin. Tätä kutsutaan vastarinnankytketyksi tyristorisillaksi. [1] Toinen tapa tehdä kaksisuuntaiseen tehon siirtoon pystyvä tasasuuntaaja, on tehdä se itsekommutoivilla puolijohdekytkimillä. Kytkiminä käytetään yleensä joko pintakanavatransistoreita (MOSFET = Metal-Oxide-Silicon-Fiel-Effect-Transistor), tai eristetyllä hilalla varustettuja bipolaaritransistoreita (IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor). Jokainen kytkin tarvitsee kuitenkin rinnalleen vastarinnankytketyn diodin. Pintakanavatransistoreissa diodi on aina mukana valmistusteknisistä syistä, mutta IGB-transistoreihin se on lisättävä. [3] Itsekommutoiva tasasuuntaaja on fyysisesti täysin sama kuin vaihtosuuntaaja, mutta sitä käytetään eri tavalla. Kuvan 1 tapauksessa syöttöverkko olisi vaihtosuuntausosion ulostulossa ja virta kulkisi tasasuuntaustilassa oikealta vasemmalle. Tällainen suuntaaja toimii samalla tavalla kuin jännitettä nostava tasasähkökatkoja, mutta kolmivaiheisena. Tasajännitteen on siis aina oltava suurempi kuin syöttävän verkon vaihejännitteen huippuarvo. [2] Kytkinten korkeataajuinen ohjaus aiheuttaa korkeataajuisia häiriötä sekä verkkoon että tasajännitteeseen. Tätä häiriötä voidaan kuitenkin tehokkaasti suodattaa. Korkean kytkentätaajuuden ansiosta verkosta otettava virta voidaan ohjata lähemmäs sinimuotoiseksi kuin mitä tyristorisillalla tai passiivisella diodisillalla saataisiin. Tällöin tasasuuntauksen aiheuttamat matalataajuiset häiriöt vähenevät merkittävästi.

Jännitettä nostavan tasasuuntauksen etuna moottorikäytöissä on sen monikäyttöisyys. Vaikka moottorin nimellisjännite olisi pienempi kuin tasasuunnattu jännite, voidaan vaihtosuuntaajan pulssinleveysmodulaatiolla säätää moottorin jännitteen tehollisarvoa aina pienemmäksi kuin syöttävä tasajännite. Vastaavasti, jos haluttaisiin diodi- tai tyristoritasasuuntaajalla syöttää vaihtosuuntaajaa, joka syöttää moottoria, jonka nimellisjännite on suurempi kuin syöttöverkon jännite, ei tämä onnistuisi. Kumpikaan tasasuuntaussilta ei pysty nostamaan jännitettä, eikä myöskään vaihtosuuntaaja. Itsekommutoiva tasasuuntaaja on siis monikäyttöisempi kuin verkkokommutoivat, mutta se tarvitsee monimutkaisemman ohjauksen.

2.1.2 Vaihtosuuntaaja

Jännitevälipiiritaajuusmuuttajan vaihtosuuntaajalla syötetään usein 3-vaiheista sähkömoottoria. Vaihtosuuntaajan pääkomponentit on esitelty kuvassa 1. Kytkiminä käytetään yleensä joko pintakanavatransistoreja tai IGBT:tä. Jännitteen tehollisarvoa säädetään pulssinleveysmodulaatiolla (PWM). Mitä pidempiä pulssit ovat, sitä suurempi on jännitteen tehollisarvo. Pulssit jaetaan symmetrisesti jokaiselle puolijaksolle keskipisteen suhteen. [2] Kuva 2 esittää moottoriin syötettävää pulssinleveysmoduloitua jännitettä ja virtaa. Käyrämuodot saadaan sytyttämällä ja sammuttamalla kuvan 1 vaihtosuuntaajan kytkimiä vaiheissa U ja V. Kun U-vaiheen ylempi kytkin ja V-vaiheen alempi kytkin ovat samanaikaisesti päällä, saadaan näiden vaiheiden välille välipiirin jännite. Sytyttämällä ja sammuttamalla samanaikaisesti näitä kytkimiä, saadaan kuvan 2 mukainen pulssinleveysmoduloitu jännite vaiheiden välille.

Moottorin staattorikäämityksessä on induktanssia vaiheiden välillä. Kun välipiirin jännitettä kytkee induktanssin yli edellä mainitulla tavalla, alkaa myös virta kasvaa staattorissa. Induktanssi kuitenkin hidastaa virranmuutosta, joten virta on jännitteen huippua jäljessä. Kuvassa 2 on piirretty myös U-vaiheen virta. Se on lähes sinimuotoista staattorin induktanssin ja mahdollisen lähtösuodattimen ansiosta toisin kuin jännite.



Kuva 2: Vaihtosuuntaajan vaihevirta ja vaiheiden välinen jännite. [4]

2.2 Sähkökäyttöjen ohjaus

Aiemmissa luvuissa käsitellyllä jännitevälipiiritaajuusmuuttajalla ohjattaessa 3-vaiheista sähkömoottoria, täytyy kytkinten ohjauksen perustua johonkin säätö- tai ohjaustapaan. Mikrokontrolleri laskee kytkinten ohjauksen perustuen moottorin ja taajuusmuuttajan malleihin. Koska taajuusmuuttajat eivät ole yleensä tiettyyn moottoriin sidonnaisia, on malleja täydennettävä moottorin parametreilla. Vakiona pysyvien parametrien lisäksi taajuusmuuttaja mittaa vähintäänkin lähtövaiheiden tai välipiirin jännitettä, sekä lähtövaiheiden virtaa. Jos pyörimisnopeuden staattisen tilan tarkkuus on tärkeä, voidaan pyörimisnopeutta mitata. Nopeus voidaan myös estimoida moottorimalleihin perustuen melko tarkasti, joten mittaus ei ole aina tarpeen. Ohjaus tarvitsee myös tietysti jonkin ohjearvon, joka voi olla pyörimisnopeus tai vääntömomentti.

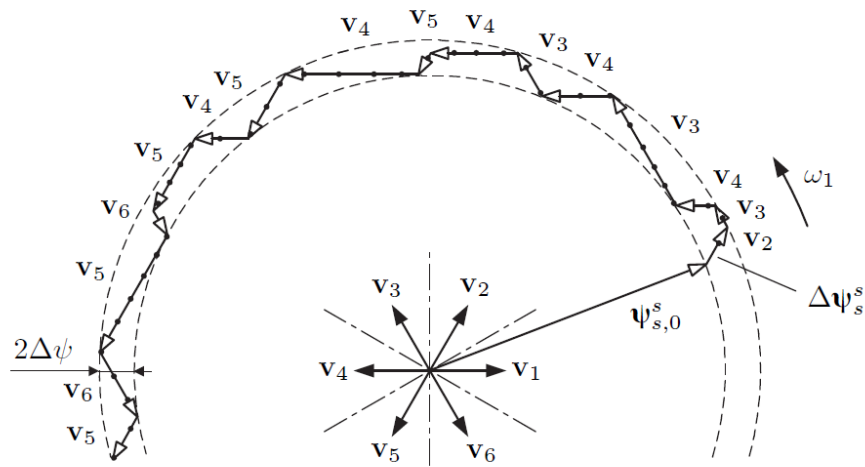
Sähkökäyttöjen ohjausmenetelmät voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan. Ne ovat skalaariohjaus, vektori säätö, sekä suora käämivuon ja vääntömomentin säätö, joista yksinkertaisin on skalaariohjaus. Siinä pyörimisnopeutta ohjataan staattorijännitteen tehollisarvoa ja taajuutta muuttamalla. Jännitettä ja taajuutta nostetaan samassa suhteessa, kunnes molemmat saavuttavat nimellisarvonsa. Nimellistaajuutta suuremmilla nopeuksilla käytetään kentänheikennystä, jolloin jännite pysyy vakiona, mutta taajuutta kasvatetaan. Yksinkertaisimmillaan skalaariohjauksessa ei käytetä nopeus- tai vääntömomenttisäätöä. Moottorin pyörimisnopeus on silloin riippuvainen jättämän suuruudesta. Jättämää kompensoimalla voidaan parantaa nopeuden tarkkuutta. Vielä parempaan tarkkuuteen päästään lisäämällä moottoriin nopeusanturi. Tällöin nopeussäätö saadaan hyvinkin tarkaksi. Skalaariohjauksen ja -säädön dynaamiset ominaisuudet ovat kuitenkin heikot, koska ne eivät ota huomioon moottorin dynaamista mallia, vaan ohjaus perustuu pysyvän tilan yhtälöihin. [5]

Vektorisäätö on huomattavasti suorituskykyisempi kuin skalaariohjaus tai -säätö. Siinä voidaan säätää erikseen moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Ohjaus perustuu mikrokontrollerille syötettyyn moottorimalliin. Vektorisäädössä käytetään yleensä roottorivuo-orientoitua moottorimallia, koska laskeminen on tällöin yksinkertaisinta. Mikrokontrolleri laskee pyörimisnopeuden ja mitattujen vaihevirtojen perusteella ohjearvot virran d- ja q-komponenteille, joista d-komponentti säätää moottorin magnetointia ja q-komponentti vääntömomenttia. Virtasäädön perusteella lasketaan staattorijännitteen ohjearvovektori, joka annetaan pulssinleveysmodulaattorille, joka ohjaa kytkinten kääntelyä. [5]

staattorivuoille ympyrän muotoiset hystereesirajat kuvan 5 mukaisesti. Staattorivuo seuraa staattorijännitettä yhtälön:

$$\psi_s^s = \int_0^t u_s^s dt + \psi_{s0}^s, \quad (2)$$

mukaisesti, missä ψ_s^s on staattorivuo, u_s^s on staattorijännite ja ψ_{s0}^s on staattorivuo-
lähtöarvo. Nyt voidaan aiemmin esiteltyjä jännitevektoreita käyttäen pitää staattorivuo
määriteltujen hystereesirajojen sisällä. Kuvan 5 tapauksessa hystereesirajat ovat
katkoviivoitetut kaksi ympyrää. Vuoympyrä on jaettu sektoreihin, joissa voi käyttää aina
vain kahta tiettyä jännitevektoria tai nollavektoreita.



Kuva 5: Vuosäätö

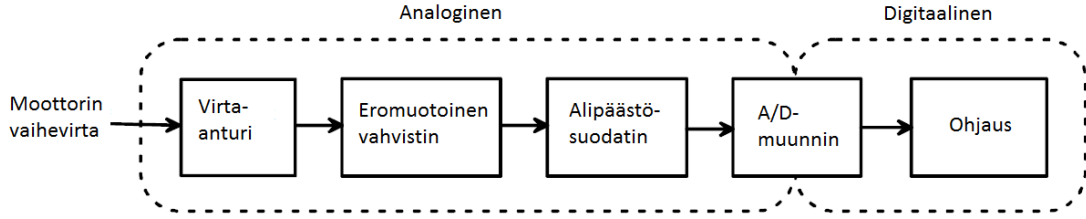
DTC:tä käytettäessä momenttisäätö perustuu staattori- ja roottorivoiden väliseen kulmaan. Staattorivuo jaetaan roottorivuo suuntaiseen ja sitä kohtisuoraan komponenttiin. Nyt kulmaa voidaan muuttaa nopeasti käyttämällä sellaista jännitevektoria, joka vie staattorivuo mahdollisimman nopeasti eteenpäin kuvassa 5. Yleensä momenttia saa suurennettua käyttämällä vähemmän nollavektoreita. Niiden käyttö näkyy kuvassa 5 pisteinä vuon kulkureitillä. Jos tarvitaan vielä suurempaa momentin muutosta nopeasti, voidaan teoriassa muuttaa sektoreiden rajoja ja ”oikaista” vuon hystereesirajoja. [6]

DTC-säätömenetelmästä on useita erilaisia versioita, joista osa voidaan luokitella myös vektorisäätömenetelmiksi. Perinteisessä hystereeseihin perustuvassa DTC-säädössä on monia ongelmia, joiden takia se ei ole sellaisenaan kovinkaan hyvä säätömenetelmä. Huonoja puolia ovat esimerkiksi kokoajan vaihtuva kytkentätaajuus, tarve todella suurelle näytteistystaajuudelle sekä virran ja vääntömomentin vääristyminen sektorien vaihdoissa. [7]

2.3 Virtatiedon käyttö taajuusmuuttajassa

Kuva 6 esittää lohkokaaviota kuinka taajuusmuuttaja yleensä käsittelee virtatietoa. Ensimmäinen laatikko vasemmalta, eli virta-anturi, voi antaa signaalin joko virtana tai jännitteenä. Jos tieto tulee virtana, on se muutettava ennen eromuotoista vahvistinta jännitetiedoksi. Vahvistimella jännitesignaalin taso muutetaan analogia-digitaalimuun-

timelle sopivaksi signaaliksi, josta suodatetaan korkeataajuiset häiriöt pois alipäästö-suodattimella. A/D-muunnoksen jälkeen tieto menee digitaalisena ohjaukselle. Koko analogisen signaalin käsittely on myös mahdollista sisällyttää virta-anturiin. Tällöin anturin ulostulo on digitaalisessa muodossa, ja se voidaan viedä suoraan ohjaukselle.



Kuva 6: Virtatiedon käsittely taajuusmuuttajassa. (muokattu lähteestä [8])

Kuten aiemmassa luvussa todettiin, käytetään taajuusmuuttajien säätöön yleensä jotakin DTC-säätömenetelmän varianttia. Toteutus on kuitenkin aina suunnittelijoista kiinni, joten tarkastellaan nyt tarkemmin perinteistä DTC:tä ja sitä, kuinka siinä hyödynnetään virta-antureilta saatavaa mittaustietoa. Tarkennetaan vielä aihetta niin, että kyseessä on nopeusanturiton 3-vaiheinen oikosulkumoottori. Tällöin moottoria mallinnetaan yleensä niin sanotulla jännitemallilla ja suureiden käsittely tapahtuu staattorikoordinaatistossa. DTC tarvitsee estimaatit staattorivuosta ja vääntömomentista. Ne estimoidaan mitattuihin jännitteisiin ja virtoihin perustuen. Staattorin jänniteyhtälö on:

$$\mathbf{u}_s^s = R_s \mathbf{i}_s^s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s^s}{dt}, \quad (3)$$

missä \mathbf{i}_s^s on staattorivirta ja R_s staattoriresistanssi. Se voidaan myös kirjoittaa muodossa:

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_s^s = \int_0^t (\mathbf{u}_s^s - \hat{R}_s \mathbf{i}_s^s) dt, \quad (4)$$

missä $\hat{\boldsymbol{\psi}}_s^s$ on staattorivuon estimaatti, ja \hat{R}_s on staattoriresistanssin estimaatti. Estimaattia varten jännite ja virta voidaan mitata, mutta staattoriresistanssia joudutaan hieman estimoimaan. Resistanssin voi mitata moottoriparametreja asettaessa, mutta se muuttuu käytössä moottorin lämpenemän takia, ja joudutaan siksi estimoimaan lämpömallin avulla. [5]

Toinen suure, jonka säätö tarvitsee, on siis vääntömomentin estimaatti. Vääntömomentti voidaan ilmaista staattori- ja roottorivoiden funktiona:

$$T_e = \frac{3p}{2} \frac{1}{L_\sigma} \text{Im}\{(\boldsymbol{\psi}_R^s)^* \boldsymbol{\psi}_s^s\} = \frac{3p}{2} \frac{1}{L_\sigma} \psi_R \psi_s \sin(\theta_{\psi_s} - \theta_{\psi_R}), \quad (5)$$

yhtälön mukaisesti, missä p on napapariluku, L_σ on hajainduktanssi, $(\boldsymbol{\psi}_R^s)^*$ on roottorivuon kompleksikonjugaatti, $\theta_{\psi_s} - \theta_{\psi_R}$ on roottori- ja staattorivoiden kulmien erotus. Yhtälö (5) on havainnollinen siksi, että siitä huomaa helposti roottori- ja staattorivoiden kulmien erotuksen vaikuttavan vääntömomentin arvoon. Roottorivuo ei kuitenkaan ole mitattavissa, joten vääntömomentti on helpoin estimoida perustuen mitattuun virtatietoon ja staattorivuohon, joka on kuitenkin estimoitava vuosäättöä varten. Vääntömomentin yhtälö voidaan siis esittää myös seuraavassa muodossa: [6]

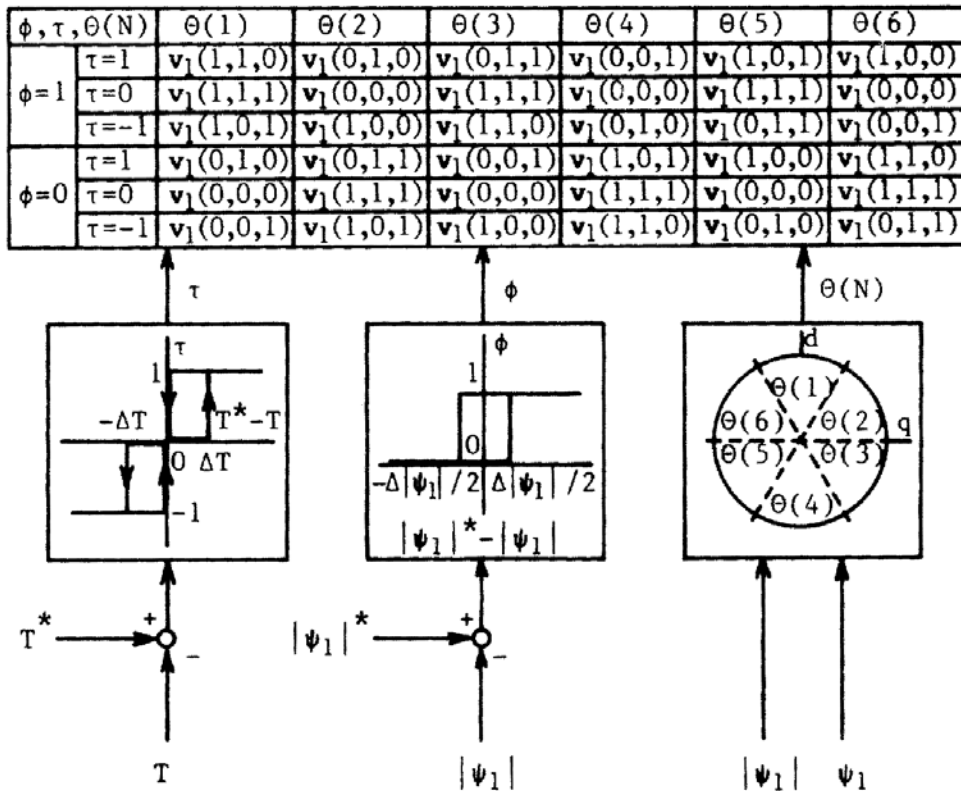
$$\hat{T}_e = \frac{3p}{2} \text{Im}\{(\hat{\boldsymbol{\psi}}_s^s)^* \mathbf{i}_s^s\}. \quad (6)$$

DTC-säätömenetelmä tarvitsee siis kaksi estimoitua suuretta ja molempien estimointiin käytetään virtatietoa. Virta-antureilta saatava virtatieto on kuitenkin muutettava vielä hetkellisarvoista d- ja q-akselien suuntaisiksi suureiksi, jotta sitä voidaan hyödyntää säädössä. Muunnoksesta käytetään nimitystä kaksiakselimallimuutos, englanniksi three-to-two-phase transformation. Virtavektori \mathbf{i}_s^s koostuu kahdesta komponentista yhtälön:

$$\mathbf{i}_s^s = i_{sd} + j i_{sq} = \frac{2}{3} \left[i_{sU} - \frac{i_{sV}}{2} - \frac{i_{sW}}{2} + j \left(\frac{\sqrt{3} i_{sV}}{2} - \frac{\sqrt{3} i_{sW}}{2} \right) \right] \quad (7)$$

mukaisesti, missä j on imaginaariyksikkö. Yhtälön oikea puoli jaetaan reaali- ja imaginaariosaan, jolloin saadaan esitettyä virta kahdella skalaariarvolla: i_{sd} ja i_{sq} . Samalla yhtälöllä muutetaan myös mitatut staattorijännitteet kaksikomponenttiseksi jännitevektoriksi säädön tarvitsemää \mathbf{u}_s^s suuretta varten. Yhtälö (7) on muokattu lähteestä [9], jotta se olisi yhteensopiva säädön yhtälöiden kanssa. Lähteessä vektorit olivat tehollisarvo-osoittimia. Ne on muutettu kuitenkin huippuarvoiksi, jotta sopisivat yllä esitettyihin vääntömomentin yhtälöihin. [9]

Estimoituja säätösuureita $\hat{\psi}_s^s$ ja \hat{T}_e verrataan haluttuihin ohjearvoihin. Jokaisella näytteenottokerralla vääntömomentti saa joko arvon -1 (pienempi kuin hystereesiraja), 0 (hystereesirajojen sisällä) tai 1 (suurempi kuin hystereesin yläraja). Staattorivuo saa arvon nolla ollessaan pienempi kuin hystereesiraja ja 1 ollessaan sitä suurempi. Näiden kahden tiedon lisäksi tarvitaan tieto sektorista, jossa staattorivuo on kyseisellä hetkellä. Nyt voidaan katsoa suoraan kuvassa 7 esitetystä taulukosta, mikä jännitevektori tuottaa parhaan vasteen. [9]



Kuva 7: DTC-säätömenetelmän kytkentätaulukko. [9]

2.4 Virtatiedon virheen vaikutus vääntömomenttiin ja pyörimisnopeuteen

Vaihtosuuntaajalla moottoria ohjattaessa säätösuureena on yleensä joko vääntömomentti tai pyörimisnopeus. Kuten luvussa 2.3 on todettu, virtatietoa käytetään vääntömomentin estimointiin. Vääntömomentilla taas säädetään pyörimisnopeutta, joten virranmittauksessa esiintyvä virhe aiheuttaa virhettä sekä vääntömomenttiin että pyörimisnopeuteen. Näin ollen virranmittauksen hyvä tarkkuus on tärkeä osa suorituskäytännön sähkökäyttöä.

Lasse Laurila on väitöskirjassaan, lähteessä [8], tutkinut virranmittauksen virheen vaikutusta kestopagneettimoottorin vääntömomenttiin. Moottorin yhtälöistä voidaan laskemalla selvittää, kuinka paljon estimoitu vääntömomentti poikkeaa oikeasta vääntömomentista erilaisilla virranmittauksen virheillä. Oletetaan että vaiheiden U ja V mitattua virtatietoa käytetään kestopagneettimoottorin vääntömomentin estimointiin. Yksinkertaisuuden vuoksi käytetään umpinapaisen kestopagneettimoottorin mallia. Tällöin suurin mahdollinen vääntömomentin suhde virtaan saadaan kun $i_{sd} = 0$, eli moottoriin ei ajeta magnetointivirtaa ollenkaan, vaan roottorin kestopagneetit tuottavat magnetoinnin. Vääntömomentin estimaatti saadaan yhtälöllä:

$$\hat{T}_e = T_e + \Delta T_e, \quad (8)$$

missä ΔT_e on vääntömomentin sykkeisyys ja T_e on oikea vääntömomentti. ΔT_e on sinimuotoinen ei-toivottu sykkeisyys vääntömomentissa, eli tässä tapauksessa virranmittauksen virheen aiheuttama virhe vääntömomentissa. Vääntömomentin sykkeisyys voidaan laskea yhtälöllä:

$$\Delta T_e = \frac{3}{2} p \psi_{PM} \Delta i_{sq} = \frac{3}{2} p \psi_{PM} \left(-\Delta i_U \sin \theta + \frac{1}{\sqrt{3}} (\Delta i_U + 2 \Delta i_V) \cos \theta \right), \quad (9)$$

missä ψ_{PM} on kestopagneettien tuottama vuo ja Δi_U ja Δi_V ovat mitattujen virtojen virheiden suuruuksia. Δi_U ja Δi_V ovat nollapistepoikkeamia suhteessa käytettyyn virtaan. Jos sijoitetaan mittausrvirheeksi + 1 % nollapistepoikkeama molemmille vaihevirroille, vaihtelee vääntömomentin virhe sinimuotoisesti ± 2 % välillä kulman θ funktiona. [8]

Toinen helposti analysoitava virhetekijä virranmittauksessa on vahvistusvirhe. Oletetaan taas, että vääntömomentin estimointiin käytetään vaiheiden U ja V virranmittaustietoja. Moottorina on edelleen kestopagneettimoottori. Dq-koordinaatistoon muutetun virtavektorin virhe voidaan johtaa muotoon:

$$\Delta i_{sq} = \frac{1}{\sqrt{3}} (k_U - k_V) \sin \left(2\theta + \frac{\pi}{3} \right) - \frac{1}{2} (k_U + k_V), \quad (10)$$

missä k_U ja k_V ovat vaiheiden U ja V vahvistusvirheitä. Pahimmassa tapauksessa, kun $k_U = -k_V$ eli vahvistusvirheet ovat vastakkaismerkkiset, saadaan yhden prosentin vahvistusvirheellä Δi_{sq} huippuarvoksi noin 1,15 %. Sijoittamalla tämä tulos yhtälöön (9) nähdään, että virhe aiheuttaa myös suoraan vääntömomentin estimaattiin saman suuruisen virheen. [8]

Nollapistepoikkeama ja vahvistusvirhe aiheuttavat siis molemmat vääntömomentin estimaattiin virhettä. Moottorin tuottamassa vääntömomentissa se näkyy vastakkais-suuntaisena virheenä. [8] Nollapistepoikkeama aiheutti amplitudiltaan suuremman virheen kuin prosentuaalisesti vastaavan suuruinen vahvistusvirhe. Vahvistusvirheen taajuus oli kaksinkertainen verrattuna nollapistepoikkeaman virheen taajuuteen.

Taajuusmuuttaja pystyy kuitenkin yleensä kompensoimaan nollapistepoikkeaman pois tekemällä ohjelmallisesti kalibroinnin virta-antureilleen. Näin saadaan ennen moottorin käynnistystä ilmenevä nollapistepoikkeama kompensoitua pois. Jos kuitenkin nollapistepoikkeama on verrannollinen esimerkiksi anturin lämpötilaan, ei kylmälle anturille tehty kalibrointi enää auta taajuusmuuttajan kuumentuessa käytössä.

3 Hall-ilmiö ja virranmittausmenetelmät

3.1 Sähkömagnetismi ja Hall-ilmiö

Virtajohtimen ympärille syntyy magneettikenttä \mathbf{H} oikean käden säännön mukaisesti, eli virran kulkusuuntaan katsottuna magneettikenttä pyörii myötäpäivään. Ilmiötä kutsutaan Ampèren laiksi. Pitkän johtimen magneettikentän ja virran yhteyttä kuvaa seuraava yhtälö

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S J dS, \quad (11)$$

missä polku Γ peittää sisäänsä alan S ja J on johtimen virrantiheys. Ampèren lain mukaan viivaintegraali magneettikentästä minkä tahansa säteistä ympyrää pitkin vastaa sisäänsä sulkeman virrantiheyden pinta-integraalia. Koska kyseessä on r säteinen ympyrä, tulee integraalista:

$$2\pi r \mathbf{H} = I. \quad (12)$$

Magneettivuon tiheyden ja magneettikentän välillä on yhteys:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (13)$$

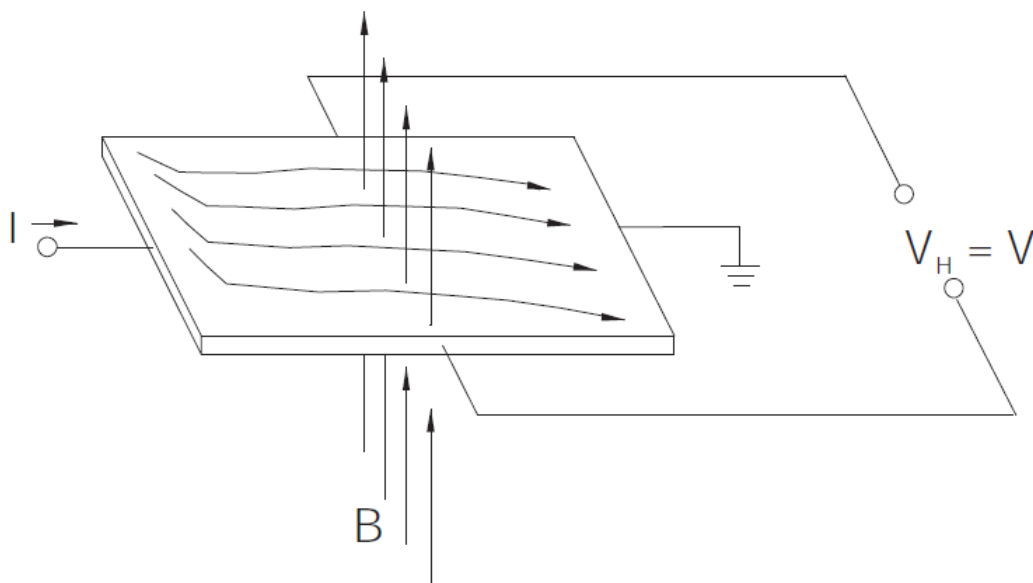
jolloin sijoittamalla edellinen yhtälöön (12) saadaan:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad (14)$$

koska $\mu = \mu_0 \mu_r$ ja μ_r on tyhjiössä 1 ja ilmassakin hyvin lähelle 1. [10]

Magneettivuontiheys on siis kääntäen verrannollinen etäisyyteen johtimesta. Lisäksi se on suoraan verrannollinen johtimen virran suuruuteen. Muut tekijät yhtälössä ovat vakioita. Yhtälö (14) ei kuitenkaan ole sellaisenaan käyttökelpoinen, kun lasketaan johtimen virtaa sen luoman magneettikentän avulla. Yhtälö olettaa virran keskittyvän äärettömän pienelle poikkipinta-alalle. Oikean virtakiskon pinta-ala ei ole äärettömän pieni. Johdin on siis jaettava osiin, joissa kaikissa kulkee jonkin suuruinen virta-alkio. Näiden virta-alkioiden aiheuttamat magneettivuontiheydet voidaan laskea yhteen ja näin ratkaista kokonaismagneettivuontiheys. Tulos on kuitenkin vain numeerinen approksimaatio. Nämä laskut on tehty myöhemmin luvussa 4.2.

Magneettikentässä olevaan virtajohtimeen syntyy potentiaaliero, joka on kohtisuorassa sekä johtimessa kulkevan virran että magneettikentän suuntiin nähden. Ilmiötä kutsutaan Hall-ilmiöksi. Kuva 8 esittää tätä tilannetta. Magneettikenttä siis lävistää johtimen ja poikkeuttaa elektroneja johtimen toiselle laidalle, jolloin johtimen reunojen välille syntyy mitattava Hall-jännite V_H .



Kuva 8: Hall-ilmiö. Magneettikentässä olevaan virtajohtimeen syntyy potentiaaliero, joka on suorassa kulmassa sekä virtaa, että magneettikenttää kohden. [11]

Jännitteen suuruus on verrannollinen ohjausvirran (I) ja magneettikentän (B) ristituloon. Ilmiötä selittää Lorentzin voimanyhtälö:

$$\mathbf{F}_L = q_0 \mathbf{E} + q_0 (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (15)$$

jossa \mathbf{F}_L on kokonaisvoima, \mathbf{E} on sähkökenttä, q_0 on varauksen voimakkuus, \mathbf{v} varauksen nopeus ja \mathbf{B} magneettivuon tiheys. Kaikki muut suureet ovat vektoreita kolmiulotteisessa xyz-tasossa paitsi varaus q_0 . [12]

Hall-ilmiö aiheuttaa siis varausten eli elektronien keskittymisen johtimen toiselle laidalle. Kun tarkastellaan vain yhteen suuntaan vaikuttavia voimia, tässä tapauksessa johtimen poikki vaakatasossa, voidaan unohtaa vektorit. Oletetaan tasapainotilanne, jossa sähkökentän ja magneettivuon tiheyden aiheuttamien voimien summa elektroneihin on nolla. Nyt voidaan merkitä vasen puoli yhtälöstä (15) nolaksi. Tällöin saadaan yhtälö muotoon:

$$0 = q_0 E + q_0 (vB). \quad (16)$$

Nyt suureet ovat skalaareita, mikä helpottaa laskemista. Lisäksi yleisesti tiedetään, että jännite on sähkökentän ja pisteiden välisen etäisyyden suhde. Tällöin saadaan edelleen johdettua yhtälö muotoon:

$$V_H = -wvB, \quad (17)$$

missä w on johtimen leveys. [12]

Hall-jännitteeseen vaikuttaa myös elektronien nopeus johtimessa. Nopeuteen taas vaikuttavat ohjausvirran suuruus, elektronien varaus, varausten tiheys (N) ja johtimen poikkipinta-ala (A_p) yhtälön:

$$v = \frac{I}{q_0 N A_p} \quad (18)$$

mukaisesti. [12]

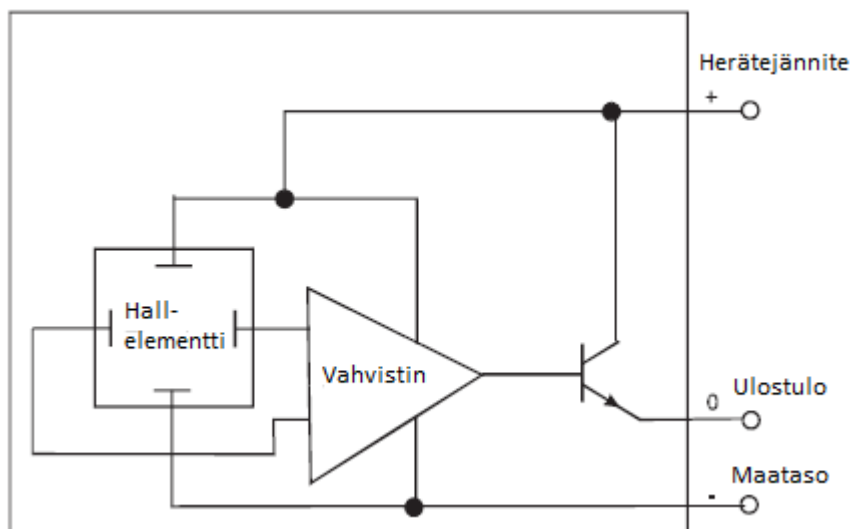
3.2 Hall-anturi

Hall-ilmiön alun perin vuonna 1879 keksinyt tohtori Edwin Hall käytti kokeessaan kultajohdinta, mutta nykyään anturit tehdään puolijohteista. [11]. Edellisessä kappaleessa todettiin, että Hall-jännitteen suuruuteen vaikuttaa magneettivuon tiheys ja elektronien nopeus. Elektronien nopeuteen johtimessa taas vaikuttaa varausten tiheys, joka on riippuvainen johtimen materiaalista. Puolijohteissa tiheys on huomattavasti pienempi kuin johteissa, esimerkiksi kuparin varaustenkuljettajien tiheys N_c on $\frac{8,4 \times 10^{22}}{cm^3}$, kun piillä se on vain $N_s = \frac{1,4 \times 10^{10}}{cm^3}$ 300 K lämpötilassa. [12]

Perinteiset johteet, kuten kupari, ovat siis käyttökelvottomia Hall-anturimateriaalina, koska Hall-jännite jää niin pieneksi. Myös puolijohteilla, kuten piillä, jää jännite hyvin pieneksi, jolloin sitäkin on vahvistettava. Esimerkiksi lähteessä [11] Hall-jännite on $7 \mu V/V_s/\text{gaussi}$ käytettäessä piitä Hall-elementtinä. V_s tarkoittaa tässä tilanteessa Hall-elementin herätevirran tuottamaa jännitettä, joka ei ole sama kuin Hall-jännite. Kyseinen anturi on tehty piille, joten kuparilla sama jännite olisi noin 10^{-12} kertainen, eli aivan mittaukselvoton.

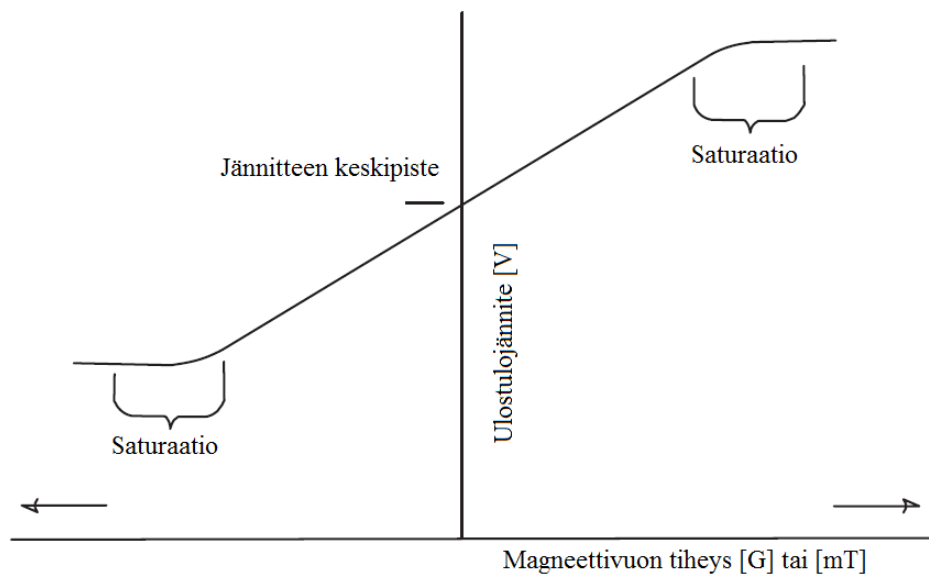
Tässä työssä virranmittaukseen käytettävän Allegro A1366 -anturin antama jännite on noin 0,5 V ja 4,5 V välillä riippuen magneettivuon tiheydestä. Nollamagneettivuon tiheyden jännite on siis näiden välistä 2,5 V. Sensorin ulostulojännite ei ole suoraan Hall-jännite, vaan sitä on vahvistettu ja kompensoitu sensorin sisällä. Kompensoinnilla tarkoitetaan lämpötilan kompensointia. Kaikkien materiaalien ominaisuudet muuttuvat lämpötilan funktiona. Tällöin muuttuvat niin Hall-elementin tuottama jännite kuin vahvistukseen käytettävän elektroniikan vahvistuskertoimetkin. Näin ollen kompensoinnilla saadaan vähennettyä lämpötilanmuutoksesta aiheutuvaa mittausvirhettä.

Hall-antureita voidaan käyttää monenlaisissa sovelluksissa. Monet sovelluksista ovat liikkeen tai paikan havaitsemista kuten näppäimistön näppäimen painalluksen havaitseminen tai oven paikkatunnistin. Sitä on myös hyvä käyttää laskurina, koska anturin ei tarvitse koskea laskettavaan kohteeseen vaan riittää, että magneetilla varustettu laskettava kohde kulkee läheltä anturia. Anturissa ei ole liikkuvia osia, joten se on kestävä ja soveltuu myös täriseviin sovelluksiin. [11]



Kuva 9: Lineaarinen Hall-anturi. (muokattu lähteestä [11])

Eri sovelluksiin tarkoitetut anturit ovat hyvin erilaisia. Ääripäinä ovat digitaaliset ja analogiset anturit. Digitaalinen anturi on tarkoitettu havaitsemaan vain kaksi erilaista tilaa: päällä tai pois päältä. Anturin sisälle on rakennettu vahvistin ja Schmitt-liipaisin, jolla on tietyt hystereesirajat. Kun anturin havaitsema magneettivuon tiheys ylittää tai alittaa nämä rajat, ulostulon tila muuttuu. Analoginen anturi sen sijaan mittaa portaattomasti magneettivuon tiheyttä. Kuva 9 esittää analogisen anturin sisältöä. Lisäksi monet valmistajat lisäävät esimerkiksi lämpötilankompensointiin tarvittavaa elektroniikkaa anturiin. Analogisen anturin ulostulo on lineaarinen sillä alueella, jota se pystyy mittaamaan. Kuvan 10 mukaisesti anturiin kohdistettu magneettivuon tiheys nostaa tai laskee ulostulojännitettä saturoitumiseen saakka. Kun magneettivuon tiheys ylittää saturoitumispisteen, ei anturi enää toimi lineaarisesti sitä suuremmilla magneettivuon tiheyksillä.



Kuva 10: Analogisen Hall-anturin ulostulojännite. (muokattu lähteestä [11])

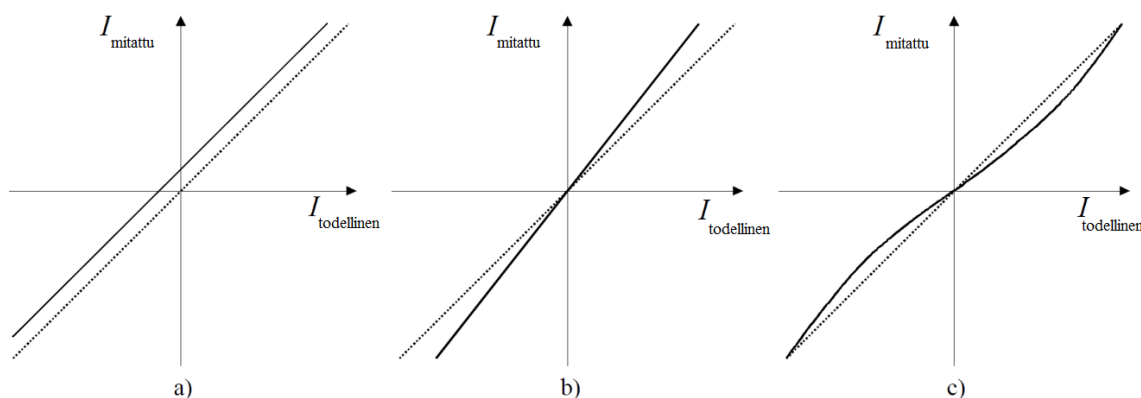
3.3 Virranmittausmenetelmät

Sähkövirta on elektronien liikettä johtimessa. Virtaa ei kuitenkaan mitata suoraan elektronien liikettä tutkimalla. Yksinkertaisin menetelmä on sunttivastus, joka on tarkka ja pieniohminen vastus, kytkettynä sarjaan virtajohtimen kanssa. Suntin läpi kulkeva virta muodostaa jännitteen Ohmin lain mukaisesti. Jännite on suoraan verrannollinen virtaan, joten mitattu jännitetieto on helppo muuntaa virtatiedoksi. Ampèren lain mukaan virtajohtimen ympärille syntyy magneettikenttä. Vastaavasti Faradayn induktiolain mukaan magneettikenttä aiheuttaa piiriin sähkömagneettisen voiman. Toinen tapa mitata virtaa perustuukin juuri virran synnyttämän magneettikentän mittaukseen. Hall-ilmiöön perustuvat virranmittaustekniikat mittaavat magneettikenttää virtajohtimen ympärillä. Myös Fluxgate-virta-anturit perustuvat virtakiskon tuottaman magneettikentän hyödyntämiseen. Siinä hyödynnetään helposti kyllästyvää magneettipiiriä, joka johtaa huomattavaan induktanssin muutokseen toisiokäämissä. Induktanssin muutoksesta pystytään päättämään mitattava virta. Faradayn induktiolakiin perustuvissa menetelmissä taas mitataan virtakiskosta käämiin indusoitunutta jännitettä, joka on verrannollinen magneettivuon muutokseen. Lisäksi on olemassa Faraday-ilmiöön perustuva virranmittaustapa, missä virtajohtimen ympärille asetettuun optiseen

valokuituun syötetään polaroitua valoa. Kierrettyään virtajohtimen, on valon aaltoliikkeen suunta muuttunut magneettikentän ansiosta. [13]

3.3.1 Virranmittausmenetelmien suorituskyky ja vaatimukset

Virranmittausmenetelmiä voidaan vertailla erilaisten suorituskykyominaisuuksien mukaan ja tietysti myös hinnan perusteella. Ideaalinen virta-anturi ilmaisisi täysin oikean virran äärettömän nopeasti sen suuruudesta riippumatta missä lämpötilassa tahansa. Tällaista virta-anturia ei kuitenkaan ole olemassa, vaan kaikille on määritettävissä esimerkiksi äärellinen tarkkuus ja suurin mahdollinen mitattava virta. Suorituskykyä mittaavat ominaisuudet voidaan jakaa staattisiin ja dynaamisiin ominaisuuksiin. Staattisia ominaisuuksia ovat nolapistepoikkeama, vahvistuksen virhe ja epälineaarisuus. Dynaamisia ovat kaistanleveys, reaktioaika, nousuaika ja etenemisviive.



Kuva 11: Virranmittauksen staattiset ominaisuudet. Katkoviivoitettu suora on oikea virta ja yhtenäinen suora on mitattu virta. a) nolapistepoikkeama b) vahvistusvirhe c) epälineaarinen virhe. (muokattu lähteestä [8])

Kuva 11 esittää virta-anturin staattisia virheitä. Nolapistepoikkeamassa nimensä mukaisesti mittasignaali näyttää muuta kuin nollaa, vaikka todellinen virta on nolla. Sama poikkeama esiintyy koko mittausalueen läpi. Virhe voi johtua esimerkiksi anturin, tai signaalin käsittelyyn käytettävän elektronikan käyttöjännitteen vääristymästä. Antureilla, joilla on magneettiipiiri keskittämässä mitattavaa magneettivuota, voi esiintyä myös magneettista nolapistepoikkeamaa. Se syntyy, jos anturi kokee liian voimakkaan magneettikentän, jolloin magneettiseen materiaaliin jää remanenssivuoto. Remanenssivuoto voi nollata suurella vastakkaissuuntaisella magneettikentällä tai tietynlaisella demagnetointisyklillä. Tässä työssä tutkittavassa Hall-pohjaisessa virranmittausratkaisussa ei käytetä magneettiipiiriä, joka voisi saturoitua, mutta esimerkiksi käyttöjännitteiden vääristymä voi aiheuttaa nolapistepoikkeamaa signaalinkäsittelyssä. [8] [14]

Kuvan 11 b) vahvistusvirhe aiheuttaa mitatun signaalin vääristymisen oikeaan verrattuna jollakin tietyllä kertoimella. Nollavirralla mittasignaalin näyttää nollaa, mutta vahvistuksessa on lineaarinen virhe, jolloin mitattu signaali poikkeaa oikeasta esimerkiksi aina yhden prosentin verran. Virheen aiheuttaja voi olla esimerkiksi mittasignaalin vahvistimen virhe.

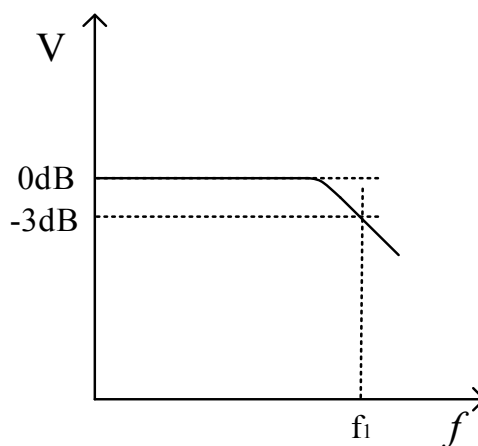
Epälineaarinen virhe voi olla esimerkiksi kuvan 11 c) mukainen. Se voi olla myös paljon epäsäännöllisempi, koska siihen vaikuttavat niin sensorin, signaalinkäsittelyelektronikan, kuin mahdollisen magneettiipiirinkin epälineaarisuudet. Epälineaarinen virhe määritellään suurimmaksi poikkeamaksi oikeasta virrasta. Se ei siis määritä minkä

muotoinen virhekäyrä on, toisin kuin nollapistepoikkeamassa ja vahvistusvirheessä. [8] [14]

Edellä mainittujen virheiden lisäksi Allegro on Hall-anturin datalehdessä määritellyt symmetrisyysvirheen heidän anturilleen. Samaa symmetrisyysvirhettä voidaan soveltaa myös virta-anturille. Kahden yhtä suuren, mutta eri merkkisen magneettivuon tiheyden pitäisi aiheuttaa itseisarvoltaan yhtä suuri jännitteenmuutos Hall-anturin lähtösignaalissa. Vastaavasti kahden yhtä suuren, mutta erimerkkisen virran tulisi aiheuttaa virta-anturin lähdössä itseisarvoltaan yhtä suuri muutos. Tässä symmetriassa voi kuitenkin olla virhettä, jonka suuruus määritellään seuraavalla yhtälöllä:

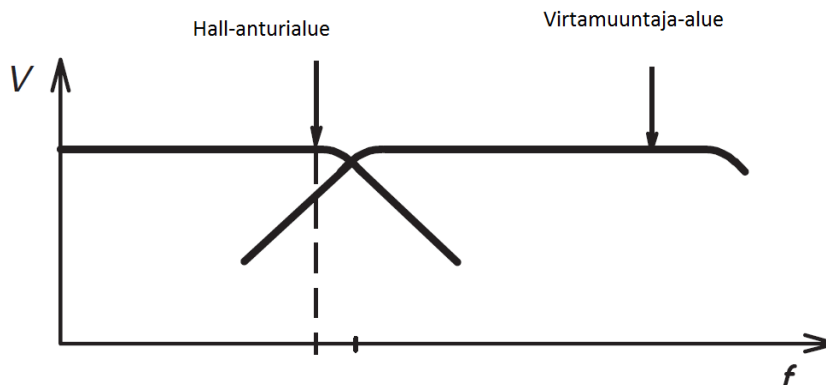
$$sym_{ERR} = \left(1 - \frac{sens_{BPOS}}{sens_{BNEG}}\right) \times 100\%, \quad (19)$$

missä $sens_{BPOS}$ ja $sens_{BNEG}$ ovat näyttämän muutokset anturin lähdössä tilanteissa, kun Hall-anturi altistetaan kahdelle yhtä suurelle, mutta erimerkkiselle magneettivuon tiheydelle. [15]



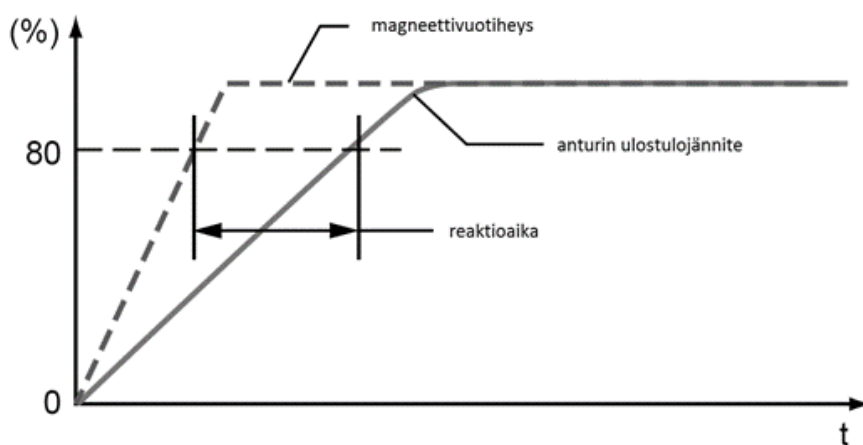
Kuva 12: Rajakulmataajuus

Kaistanleveys ilmaisee anturin kyvyn mitata eritaajuisia signaaleja eli yksikkö on hertsi. Anturin valmistaja ilmoittaa yleensä kaistanleveyden, jolla anturi toimii. Rajakulmataajuus on taajuus, jolla anturin ulostulon amplitudi on pudonnut 3 dB siitä mitä se on normaalilla mitta-alueella. Kuvassa 12 rajakulmataajuus on taajuudella f_1 . Kuvassa 13 on esitetty kompensoitunut Hall-anturin kaistanleveyskäyrä. Kompensoitu Hall-anturi esitellään luvussa 3.3.2. Hall-anturin vasteen amplitudi alkaa laskea tyypillisesti noin 10 ... 100 kHz taajuuksilla, jolloin ollaan jo virtamuuntajan kompensointikäymityksen kaistanleveydellä ja mittasignaalin amplitudi pysyy vääristymättömänä laajalla taajuusalueella. Tasavirtaa mittaavilla anturityypeillä ei ole ilmoitettu kuin ylärajataajuus, koska alarajataajuus on luonnollisesti 0 Hz. Pelkkää vaihtovirtaa mittaavilla antureilla on sekä ala- että ylärajataajuus. Kaistanleveyden määritelmä pitää aina tarkistaa valmistajan datalehdessä, koska se voi tarkoittaa esimerkiksi 3 dB tai 1 dB amplitudin vaimennusta. [12] [14]

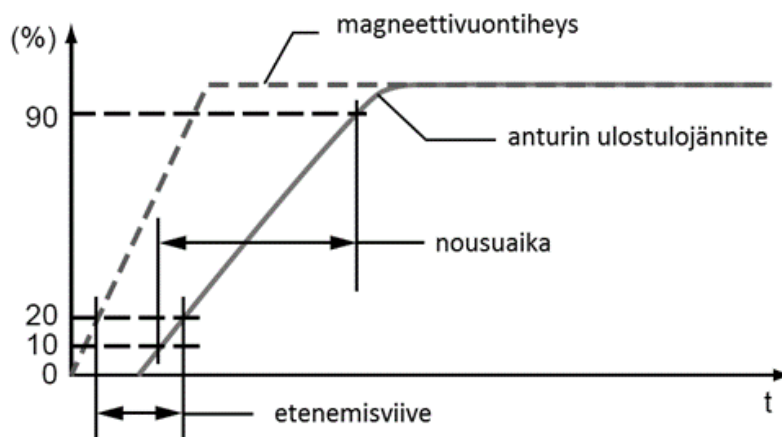


Kuva 13: Kompensoidun Hall-anturin kaistanleveys on laaja, koska pienillä taajuuksilla Hall-anturi tuottaa mittasignaalin ja korkeilla taajuuksilla sen tekee kompensointikäänitys. (muokattu lähteestä [14])

Muidenkaan dynaamisten ominaisuuksien tulkinta ei ole täysin suoraviivaista valmistajien eriävien määritelmien takia. Käytettäköön seuraavissa esimerkkinä Allegron määritelmiä, koska työssä tutkitaan Allegron Hall-anturilla toteutettua virranmittauskytkentää. Reaktioaika on aikaväli siitä, kun mitattavan virran arvo saavuttaa 80 % lopullisesta arvostaan siihen, kun anturin ulostulosignaali saavuttaa 80 % lopullisesta arvostaan. Kuva 14 esittää reaktioaikaa. Nousuaika määritetään antamalla askelmainen heräte (mitattava virta) ja mittaamalla aika vasteen (anturin ulostulosignaalin) noususta 10 % ... 90 % välillä loppuarvostaan. Etenemisviive on aika siitä kun heräte on saavuttanut 20 % loppuarvostaan siihen kun vaste on saavuttanut 20 % loppuarvostaan. Kuva 15 esittää nousuaikaa ja etenemisviivettä. [15]



Kuva 14: Reaktioaika (muokattu lähteestä [15])



Kuva 15: Nousuaika ja etenemisviive (muokattu lähteestä [15])

3.3.2 Virta-anturit

Yksinkertaisin virta-anturi on sunttivastus. Se kytketään sarjaan mitattavan virtajohtimen kanssa. Ohmin lain mukaisesti vastuksen yli muodostuu jännite, kun sen läpi kulkee virtaa. Sunttivastuksen resistanssi tiedetään, joten virta saadaan laskettua jännitteen avulla. Sunnin resistanssi on pieni, milliohmien luokkaa, koska vastuksessa kuluu tehoa sitä enemmän, mitä suurempi vastus on. Sunttivirta-anturin käyttö siis vaikuttaa piirin toimintaan tuomalla siihen lisää kuormaa, vaikkakin vastuksen arvo on niin pieni, ettei se yleensä vaikuta merkittävästi. Turhat tehohäviöt ovat kuitenkin haitaksi hyötysuhteen huononemisen sekä kuumenemisen takia. Myös piirilevyllä olevan kuparivedon, tai paksumman virtakiskon resistanssia voidaan käyttää sunttivastuksen tapaan virranmittauksessa. Hyvää siinä on pienemmät häviöt ja ettei erillistä vastusta tarvita. Kuparin resistanssin lämpötilariippuvuus on kuitenkin todella suuri, eräällä kuparivalmisteella esimerkiksi 3930 ppm/°C, kun taas sunttivastuksella se on luokkaa 20 ppm/°C. Yksikkö ppm/°C tulee englanninkielien sanoista parts per million per Centigrade eli se tarkoittaa suomeksi, että kuparin resistanssi muuttuu 0,393 % jokaista celsius-astetta kohden. Näin ollen kuparin oikea resistanssi on vaikea arvioida sen suuren vaihtelevuuden takia. Lisäksi kuparin yli mitattu jännite on todella pieni ja vaatii paljon vahvistusta, jolloin signaaliin tulee enemmän virhettä ja sen tarkkuus huononee. [13]

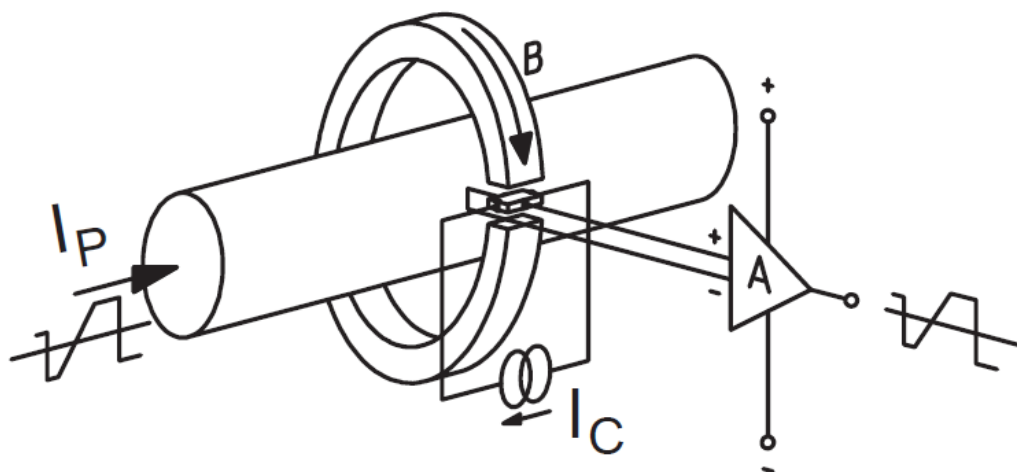
Sunttivistus on kuitenkin kokonaisuutena hyvä ja robusti tapa mitata virtaa. Sen kaistanleveys ulottuu DC-virrasta jopa megahertzeihin saakka ja lämpötilan-kompensoinnilla päästään jopa 0,1 % tarkkuuteen. [13] Ongelmana on kuitenkin galvaaninen yhteys mitattavaan johtimeen. Mitattavan johtimen jännite vaihtelee taajuusmuuttajan tapauksessa välipiirin positiivisen ja negatiivisen potentiaalin välillä, joten mittapiiri ei voi olla galvaanisessa yhteydessä kumpaankaan näistä. Mittasignaali olisi siis yleensä erotettava galvaanisesti piiristä, joka käsittelee sitä.

Faradayn induktiolakiin perustuvissa virta-antureissa on luonnostaan galvaaninen erotus mitattavasta virtakiskosta. Menetelmät perustuvat siihen, että virtajohtimen ympärille syntyy magneettikenttä, ja muuttuva magneettikenttä taas indusoi jännitteen magneettikentässä olevaan virtajohtimeen. Tätä ilmiötä hyödyntävät Rogowski-kela ja virtamuuntaja. Huono puoli näissä virta-antureissa on, että ne vaativat muuttuvan magneettikentän toimiakseen, eli niillä ei voi mitata DC-virtaa, eikä hyvin matalataajuisia virtoja. Niiden kaistanleveyden ylärajataajuus kuitenkin ulottuu megahertzeihin saakka,

ja ne ovat tarkkoja, kuten sunttivistuksetkin. Lisäksi ne kuluttavat todella vähän tehoa ja virranmittausalue ulottuu jopa mega-ampeereihin saakka. [13]

Magneettikentän mittaukseen perustuvia virta-antureita on useita. Erilaisia magneettikentän mittausten menetelmiä ovat Hall-ilmiöön perustuvat, Fluxgate-teknologiaan perustuvat, sekä anisotrooppiseen- ja suureen magnetoresistanssiin perustuvat menetelmät. Näille kaikille on yhteistä, että niiden kaistanleveys alkaa DC-virrasta, ja ne eivät ole galvaanisessa yhteydessä mitattavaan virtakiskoon. Lisäksi osa edellä mainituista mittaustavoista voidaan toteuttaa kompensoimattomina tai kompensoituina. Kompensoitujen anturien ominaisuuksia on parannettu lisäämällä esimerkiksi aiemmin esiteltyä virtamuuntajaa vastaava kompensointikäämitys. Näin saadaan yhdistettyä antureiden hyviä puolia. Esimerkiksi kaistanleveys suurenee, magneettipiirin pyörrövirrat vähenevät ja saadaan estettyä mahdollisen remanenssivuon syntyminen magneettipiiriin. Myös lämpötilan aiheuttamat vääristymät mittatulokseen pienenevät. [13]

Tämän työn aiheena oleva magneettipiiritön Hall-anturi on esitelty tarkemmin myöhemmissä luvuissa. Kun virtakiskon ympärille lisätään magneettipiiri ja sijoitetaan magneettipiirin rakoon Hall-anturipiiri, saadaan kompensoimaton Hall-anturi (englanniksi open-loop Hall effect current transducer). Kun vielä magneettisydämen ympärille lisätään kompensointikäämitys, kutsutaan sitä kompensoitukseksi Hall-anturiksi (englanniksi closed-loop Hall effect current transducer). Magneettipiirillä saadaan parannettua anturin suorituskykyä ja kompensointikäämityksellä saavutetaan suurempi kaistanleveys. Magneettipiiri ja kompensointikäämitys kuitenkin myös suurentavat virta-anturin kokoa ja hintaa, sekä tuovat joitakin ei toivottuja ominaisuuksia. Kompensoimaton Hall-anturi on esitelty kuvassa 16. Virtakiskon mitattava virta I_P luo magneettivuon ympärilleen. Kiskon ympärillä oleva magneettipiiri keskittää vuon piirissä olevaan ohueen aukkoon. Aukossa on Hall-anturipiiri, jonka läpi johdetaan herätevirta I_C . Magneettivuon tiheyden ja herätevirran vaikutuksesta Hall-elementille muodostuu magneettivuon tiheyteen verrannollinen jännite, joka vahvistetaan tarvittavalle tasolle ja voidaan näin käyttää virtatietona. [14]

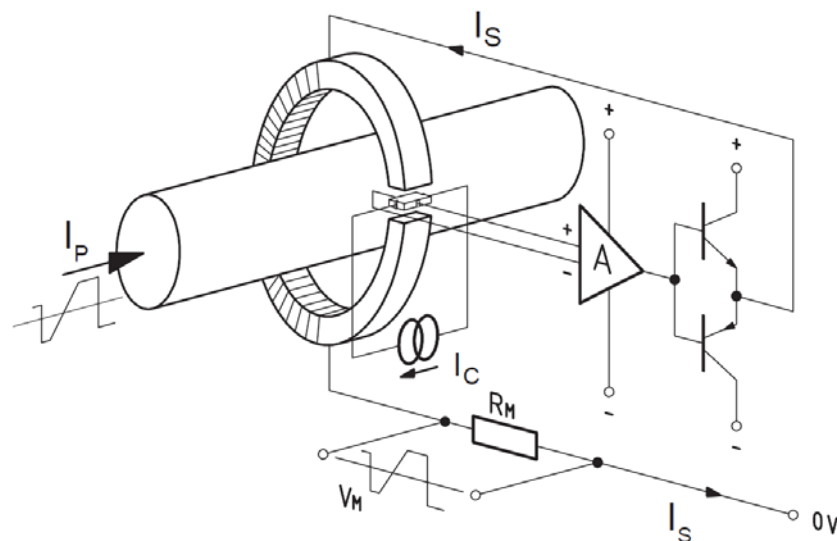


Kuva 16: Kompensoimaton Hall-anturi. [14]

Huono puoli kompensoimattomassa Hall-anturissa on sen magneettipiiri. Suurilla virroilla siihen voi jäädä remanenssivuo. Tällöin magneettipiirin vuohon jää

nollapistepoikkeama eli vaikka ulkoinen vuo olisi nolla, magneettiipiiri luo itse magneettivuon. Muihin virta-antureihin verrattuna kompensoimattomalla Hall-anturilla on keskinkertainen kaistanleveys ja reaktioaika. Vahvistus on kuitenkin herkkä lämpötilanmuutoksille, mikä aiheuttaa epätarkkuutta mittaukseen. Magneettiipiirin häviöt ovat yksi merkitsevä rajoittava tekijä. Häviöt ovat suoraan verrannolliset mitattavan virran amplitudiin ja taajuuteen. Näin ollen suuria taajuuksia mitattaessa virran amplitudi ei voi välttämättä olla nimellisarvonsa suuruinen ja myös toisinpäin suurta amplitudia mitattaessa virran taajuus ei saa olla liian suuri. [14]

Monista kompensoimattoman Hall-anturin heikkouksista päästään eroon, kun lisätään magneettiipiirin ympärille kompensointikäämitys. Tätä anturia kutsutaan kompensoituksi Hall-anturiksi, jonka rakenne on esitetty kuvassa 17. Tässä Hall-anturin ja sen lähtöasteen on tarkoitus ajaa kompensointikäämitykseen sellainen virta, että se kumoaa ensiövirran I_p magneettiipiiriin tuottaman magneettivuon. Kompensoituja Hall-antureita kutsutaankin englanniksi myös nimellä ”zero flux transducer”, eli suomeksi käännettynä nolla-vuomuunnin, koska magneettiipiirin vuo on teoriassa nolla. Nyt magneettiipiirin haitalliset pyörrevirrat jäävät lähes olemattomiksi ja remanenssivuon vaarakin pienenee. Kaistanleveys laajenee huomattavasti suuremmille taajuuksille alkaen silti DC-virrasta. Esimerkiksi komponenttivalmistaja LEM ilmoittaa kompensoitujen Hall-antureidensa tyypilliseksi kaistanleveydeksi 200 kHz, kun heidän kompensoimattomilla Hall-antureillaan kaistanleveys on vain noin 25kHz. Reaktioaika on myös huomattavasti nopeampi kompensoiduilla muuntimilla, luokkaa vähemmän kuin 1 μ s, kun kompensoimattomilla se voi olla jopa seitsenkertainen. Kuvan 13 mukaisesti kompensointikäämitys toimii virtamuuntajana korkeilla taajuuksilla, joilla Hall-anturin signaalinkäsittelyelektronikka ei kykene enää tuottamaan vääristymätöntä signaalia. [14]



Kuva 17: Kompensoitu Hall-anturi. [14]

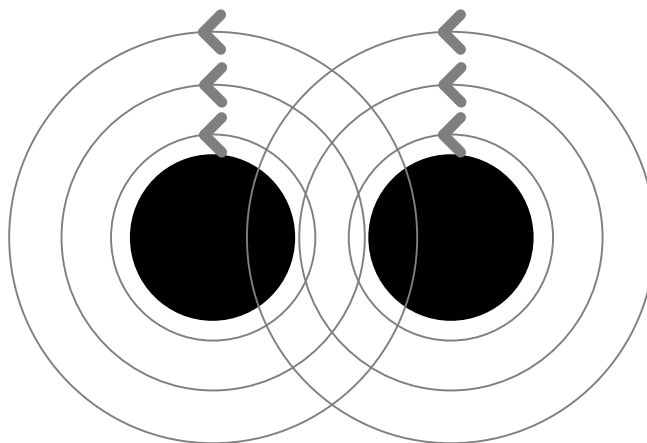
Kompensoitu Hall-anturi ei ole herkkä lämpötilanmuutoksille ja sen lineaarisuus on hyvä. Näin ollen se on huomattavasti tarkempi kuin kompensoimaton Hall-anturi. Lisäksi siitä saatava virtatieto tulee ulos virtana. Signaali on tällöin paljon sietokykyisempi häiriöisessä ympäristössä, kuin mitä jännitesignaalina siirretty virtatieto. Toisaalta virtasignaalin muuttaminen säädölle sopivaksi jännitesignaaliksi vaatii ylimääräisen suuntivastuksen, jonka läpi virta johdetaan. Näin kytkennästä tulee kalliimpi ja monimutkaisempi. Lisäksi pelkkä kompensoitu Hall-anturi on itsessään huomattavasti kalliimpi kuin kompensoimaton. Se tarvitsee myös suuret (luokkaa ± 15 V... ± 24 V)

käyttöjännitteet pystyäkseen tuottamaan virtasignaalin suurilla ensiövirroilla. Tehonkulutus on myös paljon suurempi kuin kompensoimattomalla anturilla.

Fluxgate-virta-anturi perustuu kyllästyvään magneettioppiin. Samalla tavalla kuin aiemmin esiteltyissä Hall-anturi pohjaisissa ratkaisissa, myös Fluxgatessa on magneettioppi virtakiskon ympärillä. Fluxgatesta on useita muunnoksia, joilla on hieman erilaisia suorituskkyominaisuuksia. Perinteisessä Fluxgate-anturissa on magneettioppiirissä rako, jossa on Fluxgate-elementti. Se on helposti kyllästyvä kuristin, johon syötetään herätesignaalin kanttiaalta. Vaste muuttuu kuristimen kyllästystilan mukaan. Kuten kompensoidun Hall-anturin tapauksessa, tässäkin säädetään kompensointikämmityksen virtaa Fluxgate-elementin tuottamalla signaalilla. [14]

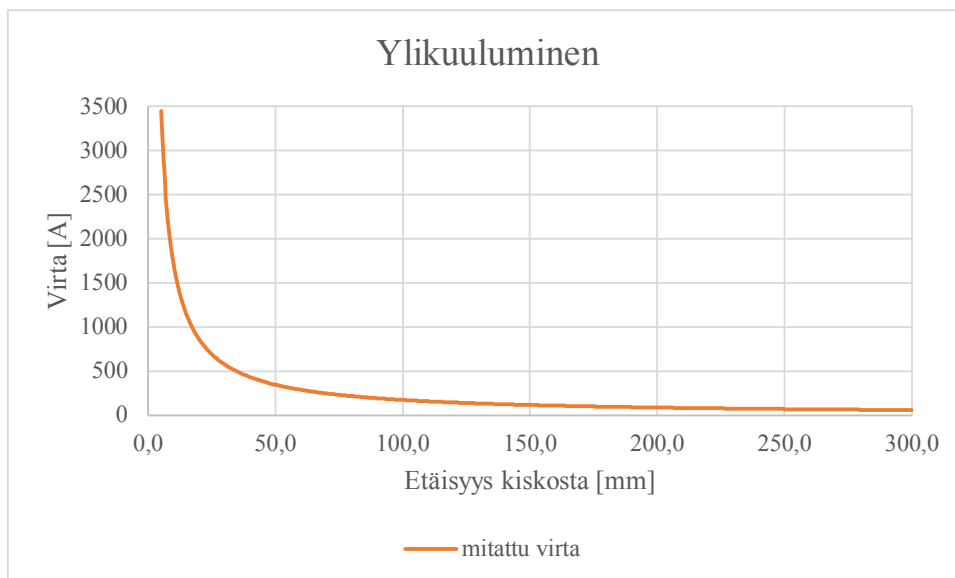
3.4 Sähkömagneettiset häiriöt

Pahin häiriönlähde magneettioppiittömällä Hall-anturilla taajuusmuuttajan virtaa mitattaessa on ylikuuluminen. Kolme vaihekiskoa sijaitsevat yleensä hyvin lähellä toisiaan, jolloin yhden luoma magneettikenttä ei ole merkityksettömän pieni toisen vaihekiskon etäisyydellä. Magneettikenttä siis ylikuuluu lähtövaiheelta toiselle. Ilmiötä havainnollistaa kuva 18.



Kuva 18: Ylikuuluminen. Mustat ympyrät ovat virtakiskoja ja harmaat viivat kuvaavat magneettikenttää. Kaksi vierekkäistä virtakiskoa aiheuttavat molemmat magneettikentän ympärilleen. Magneettikenttä ulottuu yhdeltä kiskolta toiselle kiskojen ollessa lähellä toisiaan.

Kuva 19 havainnollistaa ylikuulumisen voimakkuutta eräillä virta-anturin asetuksilla. Yksinkertaistuksen vuoksi virtakisko on oletettu äärettömän ohueksi ja äärettömän pitkäksi. Tilanne havainnollistaa luvun 5.5 ylikuulumismittauksia: Samoja virta-anturin asetuksia on käytetty kuvan piirtämisessä kuin mittauksissa. Häiriö on todella suuri varsinkin pienillä etäisyyksillä kiskosta. Kiskojen olisi siis hyvä sijaita kaukana toisistaan tai vaihtoehtoisesti häiriöiltä on suojauduttava muilla keinoilla. Kuvaa 19 katsomalla voidaan todeta että ylikuuluminen on vielä 200 mm etäisyydelläkin lähes 100 A, eli ylikuulumiselta on pakko suojautua.

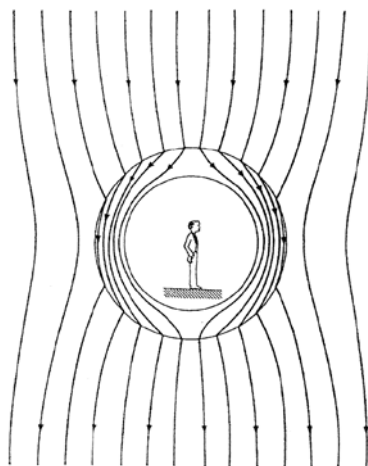


Kuva 19: Ylikuuluminen eräillä virta-anturin asetuksilla, kun häiriön lähteenä toimivasta kiskosta ajetaan 2300 A virta. Vaaka-akselilla on Hall-anturin etäisyys virtakiskosta ja pystyakselilla sen mittaama virta. Yksinkertaistuksen vuoksi on oletettu kisko äärettömän ohueksi ja äärettömän pitkäksi.

Muuttuva magneettikenttä voi myös indusoida jännitteen. Tällöin häiriön vastaanottajana ei välttämättä ole Hall-anturi, vaan johto jota pitkin Hall-anturilta viedään virtatieto taajuusmuuttajalle.

3.4.1 Ulkoisten magneettikenttien vaimennus

Viereisten virtakiskojen ei-toivottuja magneettikenttiä voidaan vaimentaa tehokkaasti koteloimalla Hall-anturit. Kotelo toimii magneettisena oikosulkuna. Kotelon materiaalilla on oltava korkea permeabiliteetti. Tällöin sen reluktanssi on pieni ja ulkoinen magneettikenttä kulkee koteloa pitkin, kuten kuvassa 20, koska ilman reluktanssi on suurempi. Magneettinen suojaus olisi mahdollista toteuttaa myös toisinpäin: Estämällä magneettikentän pääsy ulos kotelosta. Se ei kuitenkaan toimi tässä tilanteessa, koska virran meno- ja paluujohtojen pitäisi olla molempien samassa kotelossa, jotta niiden magneettikenttä pysyisi kotelon sisällä. Yksittäisen johdon magneettikenttää kotelo ei pysty pitämään sisällään. Kotelointi toimisi parhaiten, jos siinä ei olisi ollenkaan aukkoja, mutta käytännössä aukkoja on aina oltava esimerkiksi johtojen läpivientä tai jäähdytystä varten. [16] [17]



Kuva 20: Ulkoiselta magneettikentältä suojattu kotelo. [16]

Hyvän magneettisen suojakotelon suhteellisen permeabiliteetin siis pitäisi olla suuri ja materiaalin olisi oltava halpaa ja helposti työstettävää. Raudan suhteellinen permeabiliteetti on vähintään noin 100, ja puhtaalla raudalla se on noin 1000. Suurempiakin arvoja saadaan sekoittamalla siihen eri metalleja. Vertauksena kuparin ja ilman suhteellinen permeabiliteetti on noin 1. Rauta olisi siis hyvä vaihtoehto magneettiseksi suojaksi. Lisäksi se on magneettisesti pehmeä aine eli siihen ei jää paljon remanenssivuota. Remanenssivuoto tarkoittaa että kerran altistuttuaan magneettikentälle, aineen atomit järjestäytyvät niin, että aine jää ulkoapäin katsottuna magneettiseksi myös senkin jälkeen, kun ulkoinen magneettikenttä on poistettu. [16]

3.4.2 Virranahto

Tasavirralla johtimen virta jakautuu tasaisesti koko poikkipinta-alalle. Vaihtovirralla kuitenkin virta ahtautuu johtimen ulkopinnalle. Vaihtovirta aiheuttaa muuttuvan magneettikentän myös johtimen sisällä. Magneettikentän muutos indusoi johtimessa pyörrevirtoja, jotka ovat pinnalla alkuperäisen virran suuntaisia, mutta keskellä johdinta juuri vastakkaisuuntaisia. Resistanssi johtimen keskellä siis suurenee ja virta keskittyy ulkopinnalle. [3]

Tunkeutumisvyvyys on etäisyys johtimen pinnasta, jossa virrantiheys on enää $1/e$ eli noin 36,8 % pinnan virrantiheydestä. Tunkeutumisvyvyys voidaan laskea yhtälöllä:

$$D = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 \mu_c f}}, \quad (20)$$

missä ρ on johtimen resistiivisyys, μ_0 tyhjiön permeabiliteetti, μ_c johtimen suhteellinen permeabiliteetti ja f taajuus.

Kuparijohtimessa 50 Hz taajuudella tunkeutumisvyvyys on siis noin 9,2 mm. Työssä on tarkoitus mitata halkaisijaltaan 15 mm virtakiskon virtaa. Tällöin säde on 7,5 mm, eli virrantiheys on vielä kiskon keskelläkin suurempi kuin 36,8 %. Virranahto siis vaikuttaa 50 Hz taajuudella virranjakautumiseen, mutta ei hälyttävän paljon.

Myöhemmin luvussa 4.2 lasketaan virtakiskon aiheuttamaa magneettivuon tiheyttä. Laskemiseen käytetään Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Samalla mitoitustavalla laskettiin virranahdon vaikutusta magneettivuon tiheyteen. Luvussa todetaan, että virranahtoa ei tarvitse huomioida tässä tutkimuksessa.

4 Virranmittaus magneettiäirittömällä Hall-anturilla

Allegro A1366 Hall-anturi sisältää jonkin verran integroitua elektroniikkaa, jolla esimerkiksi kompensoidaan lämpötilan muutosta ja vahvistetaan mitattua signaalia. Anturin mittaussignaali ei kuitenkaan sovellu sellaisenaan virtatiedoksi tässä tutkimuksen kohteessa, vaan virtatiedon olisi oltava yhteensopiva vanhan rajapinnan kanssa. Tarkoitus olisi siis korvata kompensoitu Hall-anturi kahdella kompensoimattomalla Hall-anturilla ilman magneettivuota keskittävää sydäntä ja kompensointikäymitystä. Työ vaatii myös pienen määrän signaalinkäsittelyelektroniikkaa, koska anturin tuottama jännitesignaali on muutettava virtasignaaliksi.

4.1 Sensorin identifiointi

Kuva 21 esittää tutkittavaa Allegro A1366 -anturia. Se on 4 jalkainen, SIP-koteloinen komponentti, jonka käyttöjännite on 5 voltia ja ulostulosignaali on noin 0,5 voltin ja 4,5 voltin välillä riippuen sen mittaamasta magneettivuon tiheydestä. Magneettivuon tiheyden ollessa nolla ulostulosignaalin taso on puolet käyttöjännitteestä eli ideaalisesti tasan 5 voltin käyttöjännitteellä se on 2,5 voltia. Toimintaympäristön lämpötila saa olla - 40 ... 150 °C. Datalehden lupaamia staattisen ja dynaamisen suorituskvyn arvoja ovat: [15]

- etenemisviive: 2.2 μ s
- nousuaika: 3.6 μ s
- reaktioaika: 3.7 μ s
- kaistanleveys: 120 kHz (-3 dB)
- lineaarisuusvirhe: ± 1 %
- symmetrisyydevirhe: ± 1 %
- vahvistusvirhe: $\pm 2,5$ % 25 celsius asteen lämpötilassa (minkä lisäksi välillä - 40 ... + 25 °C $\pm 2,5$ % ja välillä + 25 ... 150 °C $\pm 2,5$ %)
- nollapistepoikkeama: välillä - 40 ... + 25 °C $\pm 0,4$ % ja välillä + 25 ... 150 °C $\pm 0,4$ %



Kuva 21: Allegro A1366 Hall-anturi [15]

4.2 Anturin sijoittaminen virtakiskon ympärille

Kuten luvussa 3.1 todettiin, on virtajohtimen aiheuttaman magneettivuon tiheyden voimakkuus kääntäen verrannollinen tarkasteltavan pisteen etäisyyteen. Tasavirta

jakautuu tasaisesti johtimen koko poikkipinta-alalle, joten eri laitojen virta-alkiot aiheuttavat huomattavan erisuuruisen magneettikentän Hall-anturin kohdalla. Tämän lisäksi anturin mittaamaa magneettikenttää laskiessa on otettava huomioon, että anturi kykenee havaitsemaan vain kohtisuoraan sen lävistävän kentän. [15]

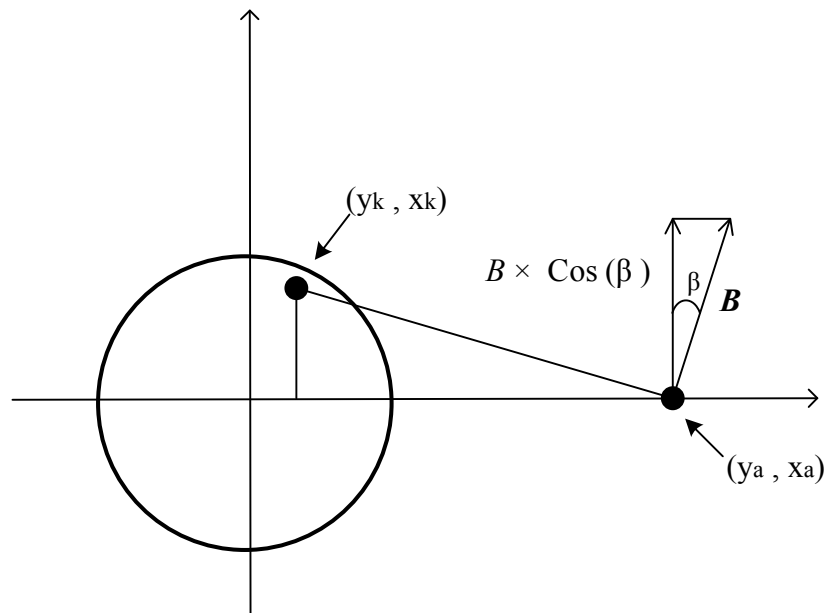
Nämä ehdot huomioon ottaen päädyttiin laskemaan Hall-anturin sijoituspaikka numeerisesti Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Mitattava virtakisko on pyöreä ja halkaisijaltaan 15 mm. Johdin jaettiin puolen millimetrin päässä toisistaan oleviin virta-alkioihin. Jokaisen näiden virta-alkion aiheuttama magneettivuon tiheys laskettiin erikseen ja lopuksi summattiin toisiinsa. Näin voitiin iteroida anturille etäisyys ja herkkyys, jolla anturi käyttää tehokkaasti koko mitta-alueensa ± 2 kA virralla sekä ± 6 kA virralla.

Tilannetta yksinkertaistettiin olettamalla, että virtajohdin on äärettömän pituinen. Tarkempi magneettivuon tiheyden voimakkuus olisi saatu pienentämällä virta-alkioiden etäisyyttä toisistaan, mutta 0,5 millimetrin oletettiin olevan tarpeeksi tarkka.

Kuvassa 22 esitetään, kuinka virta-alkioiden aiheuttamat magneettivuon tiheydet on laskettu yksi kerrallaan yhtälön:

$$\mathbf{B}_a = \frac{\cos\left(\arctan\left(\frac{y_k - y_a}{x_k - x_a}\right)\right)}{\sqrt{(x_k - x_a)^2 + (y_k - y_a)^2}} \frac{I_a \mu_0}{2\pi} \quad (21)$$

mukaan, missä y_k ja x_k ovat kiskon virta-alkion koordinaatit, y_a ja x_a ovat Hall-anturin keskipisteen koordinaatit ja I_a on virta-alkion suuruus. Johtimen kokonaisvirta jaetaan alkioden määrällä, jolloin saadaan virta-alkioille suuruus. Magneettivuon tiheyden oikeansuuruinen komponentti saadaan trigonometrian avulla. Kuvasta 22 tiedetään virta-alkion ja Hall-anturin paikat, joten yhtälön koordinaatit saadaan siitä. Yhtälö (21) on johdettu soveltamalla trigonometriaa Ampèren laista johdettuun yhtälöön (14). Yksinkertaisuuden vuoksi ilman ja kuparin suhteelliset permeabiliteetit oletettiin yhdeksi. Kuparin tarkka suhteellinen permeabiliteetti on $\mu_r = 0,999994$, kun ilmalla se on $\mu_r = 1,00000037$, eli ero on äärettömän pieni.



Kuva 22: Magneettivuon tiheyden komponenttien laskeminen. Suuri ympyrä esittää virtajohdinta, piste sen sisällä virta-alkiota. X-akselilla sijaitseva piste kuvaa Hall-anturia. Magneettivuon tiheys Hall-anturin kohdalla tiettyyn suuntaan voidaan ratkaista jakamalla virtajohdin pieniksi alkioiksi, joista jokainen tuottaa osan yhteismagneettikentästä. Näiden alkioiden magneettivuon tiheydet lasketaan yhteen, jolloin saadaan niiden yhdessä tuottama magneettivuon tiheys.

Luvussa 3.4.2 esiteltyä virranahdtilmiötä jäljiteltiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla laskemalla magneettivuon tiheys samalla tavalla kuin kuvassa 22, mutta poistamalla virta-alkioita johtimen keskeltä. Tällöin virta-alkiot siis sijoittuvat symmetrisesti johtimen laidoille ja yksittäisen virta-alkion virta on suurempi, koska sama virta jakautuu pienemmälle määrälle alkioita. Näin todettiin, että virranahdon vaikutus magneettivuon tiheyteen etäisyydellä, jolle Hall-anturi kannattaa pyöreästä johtimesta sijoittaa, on lähes merkityksetön.

Antureita on saatavilla 4 eri herkkyyttä: 1 mV/G, 2,5 mV/G, 5 mV/G sekä 10 mV/G. Näin ollen oikean anturityypin ja etäisyyden valinta täytyy tehdä arvioimalla millä yhdistelmällä on vähiten huonoja puolia. Lähtökohtana on, että halutulla maksimivirralla anturin näyttämä olisi 4,5 V. Nyt erilaisia anturin ja herkkyyden yhdistelmiä on useita. Kaukana kiskosta olevan anturin on siis oltava herkempi kuin aivan kiskon vieressä olevan, jotta näyttämä olisi sama samalla virralla. Mitä lähempänä anturi on kiskoa, sitä vähemmän siihen vaikuttavat viereisten kiskojen aiheuttamat kentät eli ylikuulumisilmiö on mitättömämpi. Liian lähelle kiskoa anturia ei kuitenkaan voi sijoittaa eristysväli vaatimusten ja kapasitiivisen kytkentymisen takia.

Kapasitiivinen kytkentymisen tarkoittaa että korkeataajuisella vaihtojännitteellä kahden johtimen välille syntyy virtareitti suuren kapasitanssin läpi. Kahden johtimen välinen kapasitanssi määritetään yhtälöllä:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (22)$$

missä ϵ_r on väliaineen suhteellinen permittiivisyys, ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, A on johdinten päällekkäin oleva pinta-ala neliömetreissä ja d niiden etäisyys toisistaan. Kun kapasitanssi tiedetään, voidaan laskea reaktanssi eri taajuuksilla yhtälön:

$$Z = \frac{1}{\omega C} \quad (23)$$

mukaisesti, missä ω on kulmataajuus. Tarkan alan määrittäminen yhtälöön (22) on vaikeaa, mutta jopa reilusti yläkanttiin arvioitaessa sensorin piipalan, jalkojen ja piirikortin vetojen yhteinen pinta-ala jää hyvin pieneksi. Näin ollen suuritaajuisillakaan signaaleilla ei synny pieni-impedanssista reittiä virtakiskosta virta-anturiin.

Eristysvälien on täytettävä sekä ilmapäälivaatimus että pintapäälivaatimus. Virranmittausanturin potentiaali on sidottu DC-välipiirin negatiiviseen jännitteeseen. Vaihekisko, jonka läheisyyteen anturi tulee, on taas moottorilähdön potentiaalissa. Standardi IEC 61800-5-1 määrittää molemmat eristysväli vaatimukset. Taajuusmuuttaja, johon virranmittausanturi suunnitellaan, luokitellaan standardin mukaan kuuluvan impulssijänniteluokkaan 4000 V. Näin ollen pienin ilmapääl olisi 3 millimetriä alle 2000 metrin korkeudessa merenpinnasta. Pintapäälivaatimusta ei tarvitse standardin mukaan ottaa huomioon, jos virtakiskon ja piirikortin välissä on vähintään 1 mm ilmapääl. [18]

Henri Mustonen tutki diplomityössään (lähde [19]) Hall-anturin sijainnin poikkeaman vaikutusta sen näyttämään, eli paljonko mittavirhettä tulee, jos kuvassa 22 anturia poikkeutetaan pystysuunnassa. Hänen työssään virtakisko oli neliskantinen, kun taas tässä työssä tutkitaan ympyrämallisen kiskon virranmittausta. Neliskanttisen kiskon kapealta sivulta mitattuna lähellä kiskoa sijaitsevan anturin poikkeama vaikutti huomattavasti enemmän näyttämään kuin kaukana kiskosta sijaitsevan anturin poikkeama. [19] Toisaalta kiskon leveältä sivulta mitattuna asetelma oli juuri toisinpäin, mutta ero ei ollut yhtä suuri. Ympyrämuotoisen kiskon tapauksessa tulokset lienevät jostain noiden välistä. Näin ollen voidaan olettaa, että anturin sijainnin poikkeama halutusta paikasta aiheuttaa enemmän virhettä anturin ollessa lähellä kiskoa kuin kaukana kiskosta.

Hall-antureiden sijainnilla ja herkkyydellä säädetään myös virranmittausalue. Mitä laajempi mittausalue halutaan, sitä epätarkemmaksi anturi luonnollisesti muuttuu. Anturin tuottama analoginen virtatieto muunnetaan taajuusmuuttajan mittaus-elektronikalla digitaaliseen muotoon. Digitaaliselle signaalille voi määrittää erottelukykyyn eli resoluution. Tämä on mitta-alue jaettuna arvojen määrällä, joita anturi voi esittää. Optimaalista olisi käyttää aina mahdollisimman suuri osa A/D-muuntimen tuloalueesta. Tässä anturissa kaikki signaalit ovat kuitenkin analogisia. Näin ollen anturin erottelukykyä ei voida määrittää. Voidaan kuitenkin laskea paljonko esimerkiksi yhden ampeerin muutos mitattavassa virrassa muuttaa anturin jännitesignaalia. Käytettäessä mittausaluetta ± 2 kA, vastaa yhden ampeerin muutos ensiövirrassa 1 mV muutosta anturin lähtösignaalissa. Vastaavasti kolme kertaa suuremmalla alueella suhde on noin 0,33 mV/A. Anturia ei siis kannata suunnitella turhaan liian suurelle virralle.

4.3 Allegro A1366 –sensorin suorituskyky ja vaatimukset

Työssä suunniteltavan virranmittausanturin olisi oltava yhteensopiva kaupallisten kompensoitujen Hall-anturien rajapintojen kanssa. Sen tulisi myös päästä mahdollisimman lähelle samaa suorituskykyä kuin kompensoitu Hall-anturi. Jo datalehteä tarkastelemalla voidaan todeta, että Allegro A1366 -sensorilla ei ole mahdollista päästä haluttuun kaistanleveyteen. Sensorin kaistanleveys on 120 kHz (-3 dB), kun kompensoidulla Hall-anturilla se on 200 kHz (-3 dB). Myös reaktioaika jää datalehtiä tarkastelemalla saavuttamatta. Herkkyydessäkin Allegron anturi jää kompensoituja Hall-antureita epätarkemmaksi sen herkkyyden tarkkuuden ollessa $\pm 2,5$ %, kun kompensoiduilla Hall-antureilla se on tyypillisesti alle $\pm 0,5$ %. [14] [15]

Saman valmistajan eri anturin suorituskykyä on tutkittu aikaisemminkin. Henri Mustonen tutki diplomityössään Allegron A1363 Hall-sensorin staattista ja dynaamista suorituskykyä. Hän sai kyseisen Hall-anturin nollapiste- ja lineaarisuusvirheiksi $\pm 0,05$ % ja $\pm 0,04$ %. Tulos on huomattavasti parempi kuin mitä datalehti lupaa ja vastaa jopa tämän työn tavoitetta eli kompensoidun Hall-anturin suorituskykyä. Mitattu vahvistusvirhe on kuitenkin hälyttävän suuri, jopa yli 10 %. Tämä kuitenkin johtunee siitä, että mittauksissa käytettiin anturityyppejä, jonka herkkyys olisi ohjelmoitava itse, eikä näin ollen ole tehtaalla tarkasti kalibroitu. Tässä työssä käytetään kuitenkin saman anturimallin tehtaalla kalibroituja versioita, joten myös herkkyyden tarkkuuden oletetaan paranevan huomattavasti. [19]

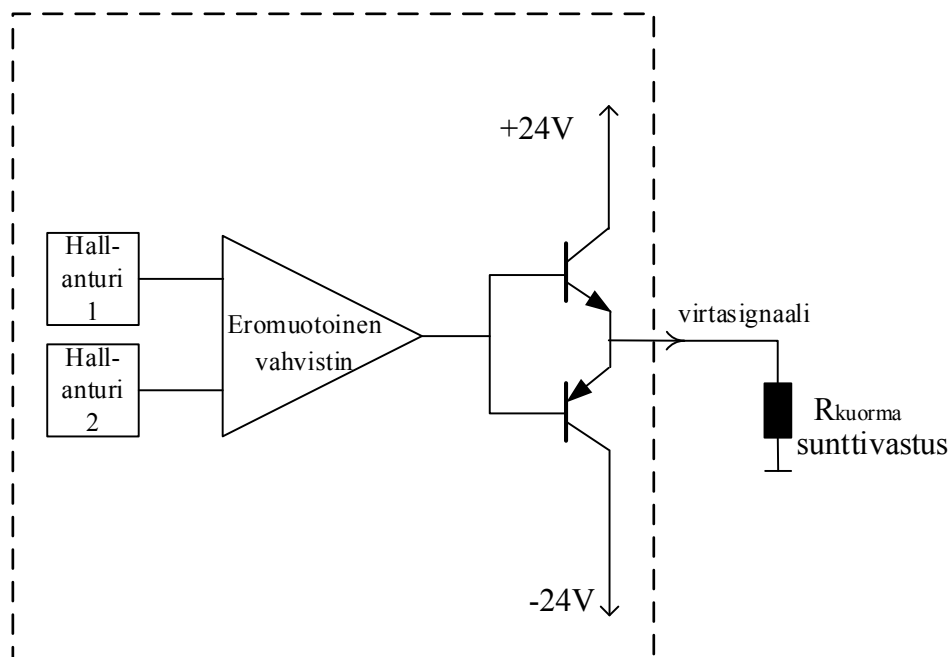
Lisää mittausvirhettä kuitenkin syntyy signaalinkäsittelyelektroniikasta ja häiriöisestä ympäristöstä. Mustonen mittasi vain anturin antamaa raakaa mittaussignaalia, joka ei ole vääristynyt matkalla taajuusmuuttajan ohjausyksikköön. Tässä työssä erona on, että sensorin antama jännitesignaali pitää muuttaa virtasignaaliksi hyvin häiriöisessä ympäristössä ja johtaa virtasignaali suuntivastukselle. Vasta suuntivastuksen yli mitattu jännite vahvistetaan ja muunnetaan digitaaliseen muotoon. Signaalia siis käsitellään ja muunnetaan eri muotoihin moneen otteeseen, joten tarkkuus kärsii varmasti jonkin verran enemmän kuin Mustosen tutkimuksessa.

Virta mitataan taajuusmuuttajan vaihekiskoista, jotka ovat yleensä häiriöisessä teollisuusympäristössä. Ehkä suurimman häiriön aiheuttavat kuitenkin saman taajuusmuuttajan vierekkäiset vaihekiskot. Ilmiötä kutsutaan ylikuulumiseksi. Viereiset virtakiskot aiheuttavat samalla tavalla kuin mitattavakin kisko magneettivuon, joka häiritsee mittauksia. Kompensoiduissa ja kompensoimattomissa Hall-antureissa ilmiö on huomattavasti lievempi, koska niissä kiskon ympäröivä magneettipiiri keksittää oikean magneettikentän Hall-anturin koloon. Nyt viereisten kiskojen magneettikenttä kuitenkin summautuu mittaukseen esteettä, tosin huomattavasti heikompana kuin oikea mitattava kenttä. Tämä voidaan nähdä selvästi Ampèren laista johdetusta yhtälöstä (14), jonka mukaan magneettivuon tiheyden voimakkuus on kääntäen verrannollinen etäisyyteen virtakiskosta. Ylikuulumisesta johtuvaa häiriötä voidaan pienentää esimerkiksi asettamalla anturit lähelle mitattavaa kiskoa, jolloin hyödyllinen magneettivuon tiheys on huomattavasti suurempi kuin haitalliset. Ne voi myös asettaa niin, että häiriöllisen vuon kohtisuora komponentti olisi mahdollisimman pieni. Tämä perustuu kappaleessa 4.2 mainittuun anturin ominaisuuteen, että anturi pystyy mittaamaan vain sitä kohtisuorassa olevaa magneettivuon tiheyttä. Kolmas tapa vähentää ylikuulumisesta johtuvaa häiriötä on sijoittaa jokaisen virtakiskon ympärille kaksi kappaletta antureita. Näin saadaan ylikuuluva magneettikenttä näkymään anturiparille yhteismuotoisena häiriönä, jolloin se voidaan poistaa differentiaalivahvistimella. Tämäkään ei tietenkään poista ylikuulumista kokonaan, koska häiriökenttiä tulee monesta suunnasta ja ne ovat erivahvuisia eripaikoilla sijaitsevien sensoreiden kohdalla. Magneettikenttä ei ole täysin symmetrinen virtakiskojen ympärillä, koska lähietäisyydellä sijaitsee materiaaleja, jotka vääristävät magneettikenttää. Tämäkin vaikuttaa Hall-sensorin näkemään magneettivuon tiheyteen.

4.4 Signaalinkäsittelypiirin suunnittelu

Mitattava virta-alue on ± 2000 A. Ylivirtaa on pystyttävä mittaamaan hetkellisesti jopa ± 6 kA. Anturin pitäisi tuottaa 1:5000 virtasignaali taajuusmuuttajan mittaus-elektroniikalle. Hall-anturin tuottama signaalitieto on muutettava 0,5 ... 4,5 voltin jännitesignaalistä halutuksi virtasignaaliksi. Kaupallisten kompensoitujen Hall-antureiden rajapinta sisältää yleensä positiivisen ja negatiivisen käyttöjännitteen ± 24 voltia, sekä virtasignaalin ulostulon, joten suunniteltavalla virta-anturilla on oltava

samanlainen rajapinta yhteensopivuuden saavuttamiseksi. Virtasignaalin amplitudin pitäisi olla kuormasta riippumaton, mutta kuormavastukselle ilmoitetaan kuitenkin yleensä rajat. Käyttöjännitteet ovat tarpeeseen nähden melko suuret ja niiden välissä oleva maataso ei ole saatavilla virta-anturille. Jännitteen laskeminen hakkuriteholähteillä ei tässä tapauksessa onnistu. Hakkurin kytkimen kääntelystä aiheutuva virran sykkeisyys palaa virtasignaalin johdinta pitkin maatasoon. Signaalin on kuitenkin oltava todella pienihäiriöinen, koska yhdenkin milliampeerin virhe tarkoittaa jo viiden ampeerin virhettä ensiövirranmittauksessa. Signaalinkäsittelyelektroniikka ei kuitenkaan yleensä kestä 48 voltin käyttöjännitteitä, tai jos kestä, niin muut tärkeät ominaisuudet ovat heikompia. Lisäksi Allegron A1366 Hall-anturit tarvitsevat 5 V käyttöjännitteen. Näin ollen jännitettä täytyy laskea kortilla häviöllisesti.



Kuva 23: Virta-anturin lohkokaavio. Hall-anturit sijoitetaan virtakiskon molemmiin puolin. Katkoviivoitettu alue sijaitsee kortilla.

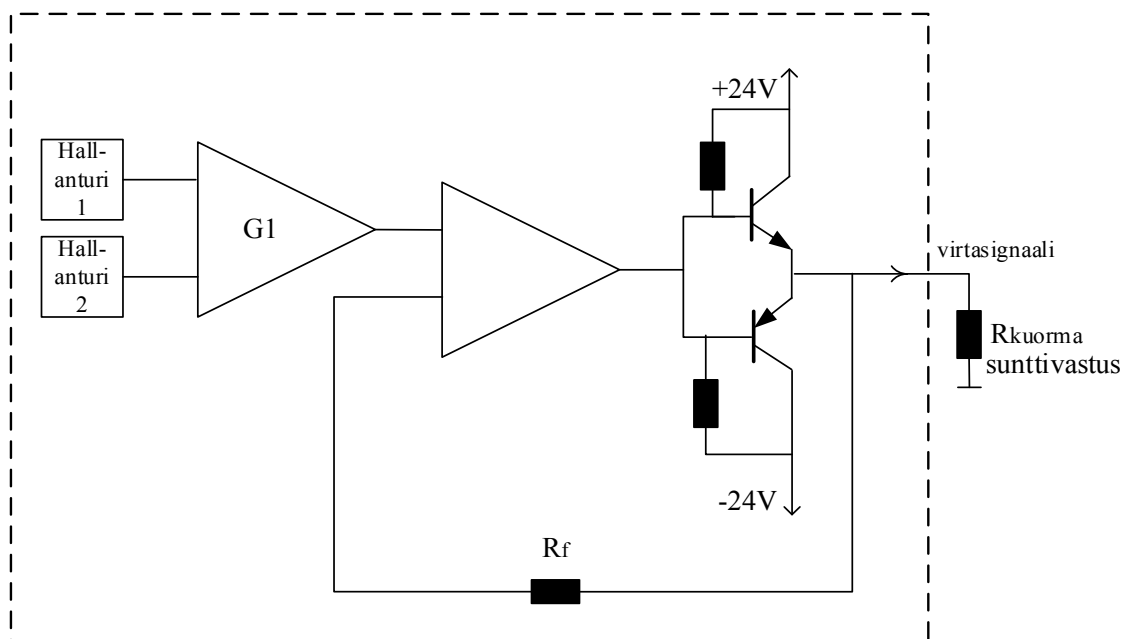
Kuva 23 esittää lohkokaaviota kytkennän perusideasta. Kaksi Hall-anturia sijoitetaan virtakiskon eri puolille. Ne toimivat 180 asteen vaihesiirrosta toisiinsa nähden. Eli kun Hall-anturi 1 kokee magneettivuon tiheyden B_1 , kokee Hall-anturi 2 magneettivuon tiheyden $-B_1$. Kytkennän etu on se, että jos anturit kokevat ei-toivotun, yhteismuotoisen magneettivuon tiheyden, eromuotoinen vahvistin poistaa tämän. Asetetaan eromuotoisen vahvistimen vahvistukseksi 0,5 ja altistetaan kytkentä hajavuolle B_H . Tällöin saadaan eromuotoisen vahvistimen ulostuloon B_{tot} seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$B_{tot} = \frac{B_1 + B_H - (-B_1 + B_H)}{2} = B_1. \quad (24)$$

Eli hajavuot kompensoituvat pois. Eromuotoisen vahvistimen ulostulon suure ei tietenkään ole magneettivuon tiheys, mutta yhtälö (24) kuvaa sitä kuinka eromuotoinen vahvistin kompensoi yhteismuotoisen magneettikentän vaikutuksen mittasignaalisissa.

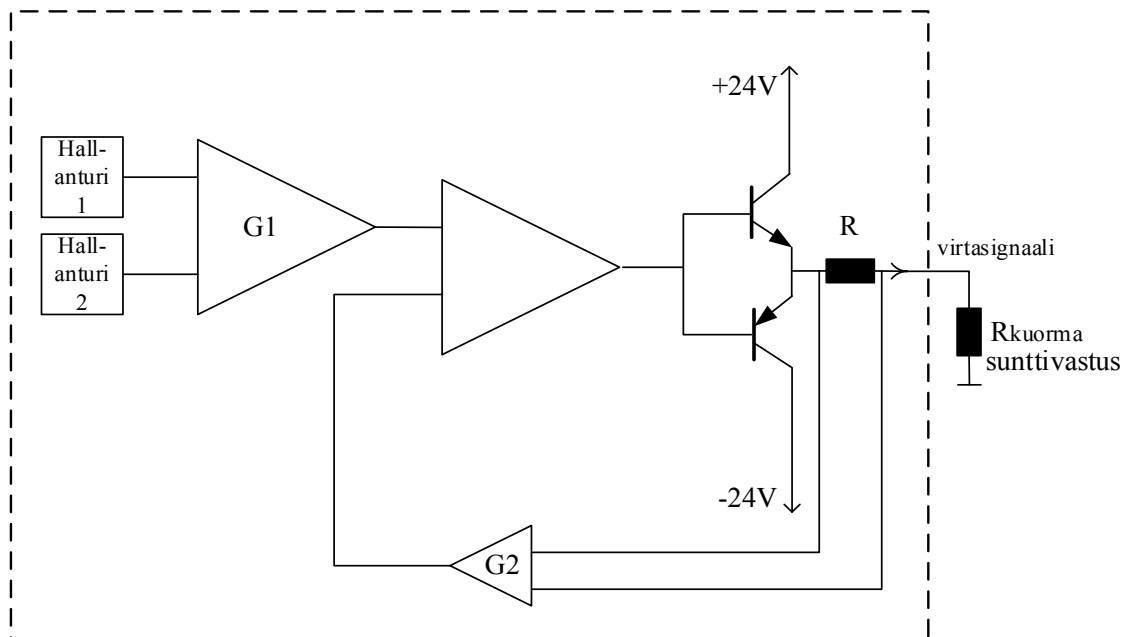
Jännite-virta-muunnoksen toteutusta suunniteltiin simuloimalla erilaisia piirejä. Lähtökohtana on, että Hall-antureiden signaali vahvistetaan eromuotoisella vahvistimella. Sen jälkeiseen signaalinkäsittelyyn harkittiin monenlaisia ratkaisuja esimerkiksi simuloimalla. Yksi vaihtoehto olisi käyttää transkonduktanssivahvistinta, joka muuttaa jännitesignaalin virtasignaaliksi. Se olisi toteutettavissa joko valmiina

integroituna piirinä tai yleiskäyttöisillä operaatiovahvistimilla. Ongelmaksi kuitenkin muodostui rajallinen virransyöttömahdollisuus. Anturin pitäisi pystyä hetkellisesti ylivirtatilanteessa tuottamaan 6 kA vastaava virtasignaali eli 1,2 ampeeria. Yhtään käyttöön sopivaa valmista traskonduktanssivahvistinta ei löytynyt ja yleiskäyttöisilläkin operaatiovahvistimilla ampeerin suuruinen ulostulovirta on harvinainen. Vaikka tällaisia operaatiovahvistimia löytyykin joitakin malleja, ovat niiden muut ominaisuudet siinä tapauksessa heikompia, ja ne eivät kelpaa esimerkiksi tarkkuuden tai nopeuden takia tähän tarkoitukseen.



Kuva 24: Signaalinkäsittelypiiri ehdotus.

Kuvassa 24 on esitetty ensimmäinen signaalinkäsittelypiiri, jota simuloitiin. Hall-antureiden tilalla käytettiin signaalilähteitä. Mallinnettu piiri ei vastaa todellisuutta, koska signaalilähteet kytkettiin maata vasten. Oikealla kortilla ei kuitenkaan tule olemaan käyttöjännitteiden välissä olevaa maatasoa. Eromuotoisen vahvistimen tuottama lähtösignaali ajaa negatiivisella takaisinkytkennällä varustettua operaatiovahvistinta, joka puolestaan ajaa AB-luokan vahvistinta. Operaatiovahvistimen takaisinkytkentä otetaan AB-luokan vahvistimen jälkeen, jotta vahvistimen epäideaalisuudet saataisiin pois virtasignaalista. Katkoviivoitetulla alueella oleva osa piiriä on anturikortilla, ja sen ulkopuolella olevaan sunttivastukseen ajetaan virta. Sunttivastus ei siis enää kuulu virta-anturiin, vaan sijaitsee taajuusmuuttajan mittauselektronikassa. Simulaation mukaan kytkentä on tarkka ja toimii hyvin ideaalisessa tilanteessa. Käyttöjännitteiden epäsymmetrisyys kuitenkin aiheuttaa helposti virhettä mittaukseen. Vain toinen käyttöjännitteiden hakkureista on takaisinkytketty, joten ei voida täysin luottaa niiden olevan symmetrisiä. Näin ollen kytkentä hylättiin.

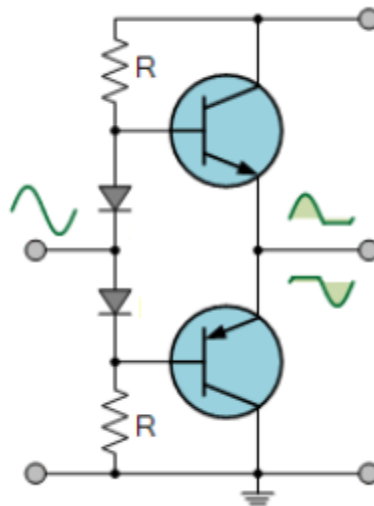


Kuva 25: Lopullinen kytkentä

Kuva 25 esittää tapaa, jolla kytkentä päädyttiin lopulta tekemään. Se ei ole niin herkkä käyttöjännitteen vaihtelulle kuin edellinen, mutta se on kuitenkin hieman monimutkaisempi. Idea on, että Hall-antureiden erosuure U_{diff} vahvistetaan kertoimella $G1$. Mittausvastuksen R yli oleva jännite U_{meas} vahvistetaan kertoimella $G2$. Näiden signaaleiden ero ajaa B-luokan vuorovaihevahvistinta (englanniksi push-pull amplifier), joka pyrkii nollaamaan eron keskimmäisen operaatiovahvistimen takaisinkytkennän ansiosta. Stabiilissa tilassa siis pätee:

$$U_{\text{diff}} \times G1 = U_{\text{meas}} \times G2. \quad (25)$$

Myös tämän vahvistinasteen olisi voinut toteuttaa AB-luokan vahvistimena kuten kuvassa 24. Kuitenkaan simulaattorissa B- ja AB-luokan vahvistinten välillä ei ollut huomattavaa eroa, joten päädyttiin yksinkertaisempaan ratkaisuun eli B luokan vahvistimeen. AB-luokan vahvistimeen voisi myös kuvan 26 mukaisesti lisätä diodit, jolloin transistorin kannan esijännitettä saataisiin parannettua vielä enemmän. Tällöin tosin häviöt kasvaisivat, koska olisi hetkiä, jolloin molemmat transistorit johtavat. Hyvä puoli siinä olisi nollakohdan ylityksestä aiheutuvan särön pieneneminen ulostulosignaaliissa. [20] Simuloinnissa särö oli kuitenkin niin pieni, että myöskään diodit eivät tuoneet huomattavaa parannusta signaaliin ja päädyttiin siis B-luokan vahvistimeen.



Kuva 26: AB-luokan vahvistin. (muokattu lähteestä [20])

Kytkenällä on tarkoitus pystyä mittaamaan ± 2000 A virtaa ja hetkellisesti jopa ± 6000 A ylivirtaa. Anturin muuntosuhteeksi halutaan 1:5000. Mittausvastusta R , vahvistuksia G1 ja G2, sekä Hall-anturin herkkyyttä ja etäisyyttä muuttamalla voidaan muuttaa mitta-aluetta helposti. Esimerkiksi, jos halutaan koko mitta-alue ± 2000 ampeerin mittaamiseen, asetetaan Hall-anturit niin, että suurimmalla virralla niiden näyttämät ovat 0,5 V ja 4,5 V eli $U_{\text{diff}} = 4$ V. Käytetään vahvistuksia G1 ja G2, sekä asetetaan mittavastus $R = 1 \Omega$. Nyt virtasignaali I_{out} pitää olla ensiövirta jaettuna muuntosuhteella 5000, eli:

$$I_{\text{out}} = \frac{2000}{5000} A = \frac{U_{\text{meas}}}{R} = 0,4 A. \quad (26)$$

Sijoittamalla mittausvastuksen arvo edelliseen saadaan:

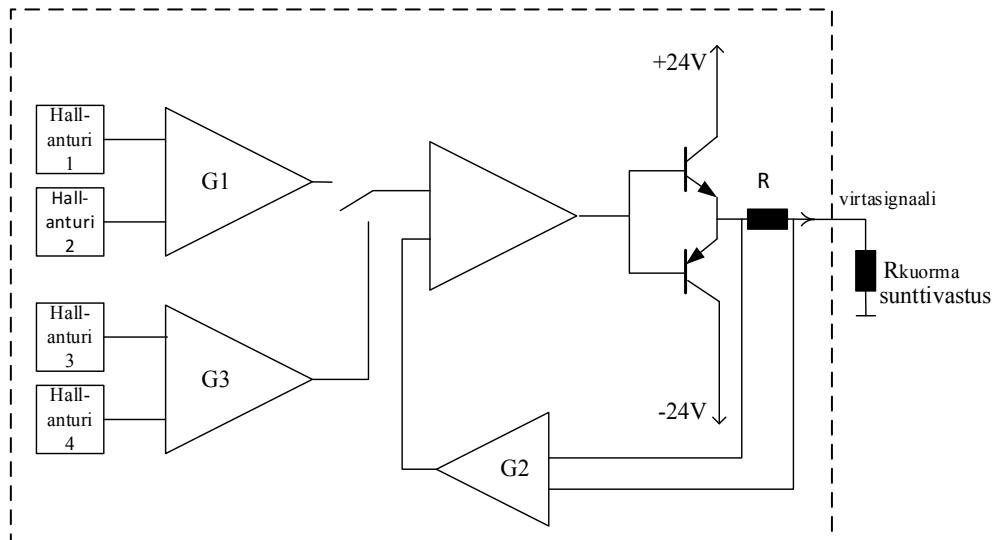
$$U_{\text{meas}} = 0,4 V. \quad (27)$$

Nyt voidaan ratkaista vahvistusten G1 ja G2 suhde sijoittamalla U_{meas} ja U_{diff} yhtälöön (25):

$$\frac{G1}{G2} = \frac{U_{\text{meas}}}{U_{\text{diff}}} = \frac{0,4 V}{4 V} = 0,1. \quad (28)$$

Siirtämällä Hall-antureita kauemmas alkuperäisestä paikasta tai vaihtamalla ne vähemmän herkäksi versioksi, voidaan laajentaa mittausaluetta. Samalla eromuotoisten vahvistimien vahvistusta tai mittausvastuksen arvoa on muutettava. Esimerkiksi pienentämällä mittausvastus kolmasosaan alkuperäisestä, saadaan virtasignaali yhtälön (26) mukaan suurimmillaan 1,2 A, mikä vastaa 6000 A ensiövirtaa.

Toinen tapa, jolla ylivirtaa voidaan mitata, on vaihtaa antureita siinä vaiheessa, kun normaali mittausalue ylittyy. Tätä varten mitoitettiin kalustuspaikat kahdelle ylimääräiselle anturiparille. Pienellä hystereesillä varustetut komparaattorikytkennät vaihtavat tilansa, jos virta joko ylittää 1900 A tai alittaa -1900 A. Kun komparaattori vaihtaa tilaansa, muuttaa kytkin piiriä niin, että signaali tulee antureilta, jotka mittaavat virtaa laajemmalla alueella. Kuva 27 havainnollistaa tätä ratkaisua.



Kuva 27: 4 Hall-anturilla toteutettu kytkentä.

5 Mittaukset

5.1 Vertailtavat virta-anturit

Vertailtavina antureina ovat:

- Itse suunniteltu Hall-anturipohjainen magneettipiiritön virranmittauskortti CLCE-01
- referenssinä käytettävä kaupallinen kompensoitu Hall-anturi
- Rogowski-kela (käytetään referenssinä)
- sunttivastus (käytetään referenssinä).

Referenssinä käytettävän kompensoidun Hall-anturin mittausalue on ± 2100 A. Kokonaistarkkuus, joka sisältää niin nollapistepoikkeaman, lineaarisen, kuin vahvistusvirheenkin, on 0,4 % 1000 A virralla datalehden mukaan. Tämän anturin suorituskykyyn olisi tavoite päästä CLCE-01:llä. Anturin tuottama mittasignaali tulee virtana, kuten suunnitellun virranmittauskortinkin. Anturin tuottama virtasignaalin suhde ensiövirtaan on 1:5000.

Rogowski-kelaa käytetään dynaamisen suorituskyvyn testeissä referenssinä, koska sen tiedetään olevan tarkkuudeltaan ja dynaamisilta ominaisuuksiltaan hyvä. Sen tuottama virranmittausignaali tulee jännitesignaalina oskilloskoopille suhteessa 0,5 mV/A. Rogowski-keloa käytetään myös vertailukohtana, kun tutkitaan vaihtosuuntaajan sisäistä virranmittausta luvussa 5.6. Tällöin Rogowski-kelojen herkkyys on 1 mV/A. Rogowski-kelojen ja käytetyn oskilloskoopin tarkemmat tiedot löytyvät liitteestä A.

Sunttivastusta käytetään referenssinä staattisen suorituskyvyn mittauksissa. Vastuksen resistanssi on 40 $\mu\Omega$ ja sen yli syntyvä jännite mitataan yleismittarilla. Myös käytetyn sunttivastuksen ja yleismittarin tarkemmat tiedot löytyvät liitteestä A. Myös osassa testeistä käytetyn jännitelähteen, virtalähteen ja sääkaapin tarkemmat tiedot löytyvät liitteestä A.

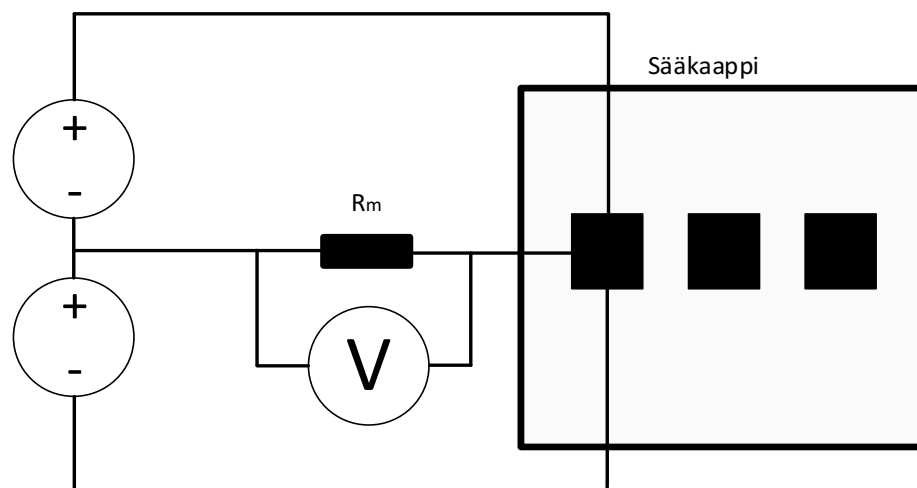
Itse suunniteltu virranmittauskortti CLCE-01 on esitelty luvussa 4. Se on rajapinnaltaan täysin yhteensopiva tyypillisen kaupallisen kompensoidun Hall-anturin kanssa. Kuten luvussa 4 mainittiin, suunniteltiin korttipohja niin, että ± 6 kA mitta-alue on mahdollista toteuttaa kahdella tapaa. Ensimmäinen mahdollisuus on, että yksi Hall-anturipari voi mitata koko ± 6 kA mitta-alueen. Toinen mahdollisuus on, että yksi pari mittaa ensin ± 2 kA ja virran itseisarvon ylittäessä noin 2 kA vaihtuu mittaus toiselle anturiparille, jonka mitta-alue ylittää ± 6 kA saakka. Rajallisen ajan vuoksi testit päädyttiin tekemään pelkästään ensimmäisenä mainitulla tavalla eli yhdellä anturiparilla mitataan koko ± 6 kA alue.

CLCE-01 tehtiin ulkoisilta mitoiltaan kiinnityksen kannalta yhteensopivaksi referenssivirta-anturin kanssa. Se on kuitenkin leveydeltään pienempi, koska paksua magneettipiiriä ei tarvita. Anturi mahtuisi huomattavasti pienempäänkin tilaan, jos kiinnityksen kannalta ei tarvitsisi säilyttää yhteensopivuutta. Mitattu tehonkulutus oli molemmilla täysin sama, mutta sitäkin olisi CLCE-01:llä mahdollista pienentää, jos valmistettaisiin versio, jossa ei ole kahden Hall-anturiparin optiota. Nyt käyttämättömät komparaattorit ja analoginen kytkin kuluttavat turhaan tehoa.

5.2 Nollapistepoikkeama

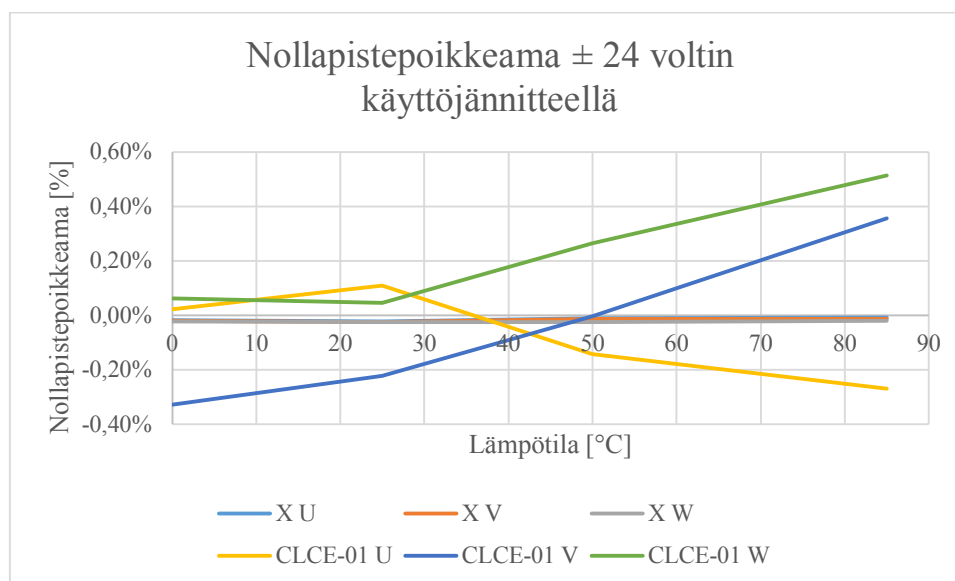
Nollapistepoikkeaman mittauksissa on tarkoitus selvittää virta-anturin näyttämä nollavirralla. Luvussa 3.3.1 on selitetty tarkemmin nollapistepoikkeama ja luvussa 2.4

laskettu sen vaikutus moottorin vääntömomenttiin. Mittaukset tehdään kolmelle kappaleelle CLCE-01 virta-antureita, sekä kolmelle kappaleelle kaupallisia kompensoituja Hall-antureita. Tarkoituksena on laittaa virta-anturit sääkaappiin ja testata niiden nollapistepoikkeama tietyn toimintalämpötila-alueen yli. Sääkaapissa saa säädettyä lämpötilaa ja ilmankosteutta, mutta tässä tapauksessa pelkkä lämpötila muuttujana riittää. Lisäksi anturit testataan jokaisessa lämpötilassa kolmella eri käyttöjännitteellä. Käyttöjännitteiden muutos ei saisi myöskään vaikuttaa nollapistepoikkeamaan merkittävästi, koska antureiden käyttöjännitteissä voi esiintyä poikkeamia normaaliarvosta. Kuva 28 esittää nollapistepoikkeaman mittauksissa käytettyä mittauslaitteistoa.



Kuva 28: Nollapistepoikkeaman mittauslaitteisto. Mustat neliöt sääkaapin sisällä ovat testattavia laitteita, eli virta-antureita.

Kuten luvussa 4 on kerrottu, antureille syötetään ± 24 voltin käyttöjännite ja ulostulona on mitattava virta suhteessa 1:5000. Virta johdetaan mittausvastuksen R_m läpi käyttöjännitelähteen maatasoon, jolloin voidaan yleismittarilla mitata jännite mittausvastuksen yli, ja laskea siitä anturin mittaaman virran arvo.



Kuva 29: Nollapistepoikkeama ± 24 voltin käyttöjännitteellä. Vaaka-akselilla on lämpötila ja pystyakselilla nollapistepoikkeama prosentteina suhteessa 2000 A. X

tarkoittaa kompensoitua Hall-anturia. U , V ja W tarkoittavat moottorin lähtövaiheita, eli kolmea eri virta-anturiyksilöä.

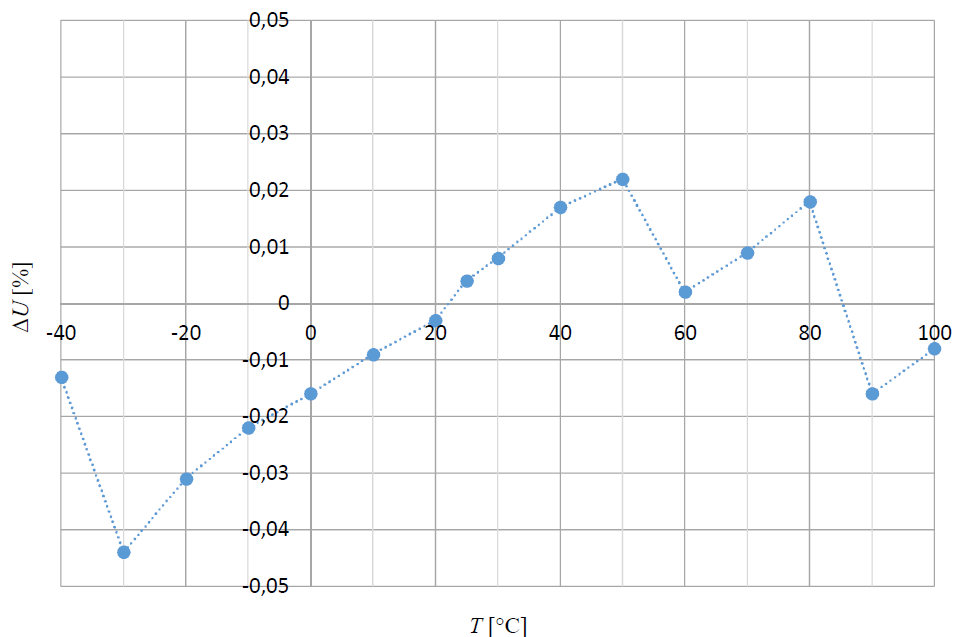
Kuva 29 esittää kuuden testatun CLCE-01:n mittaustuloksia. Anturit testattiin lämpötiloissa 0 °C, 25 °C, 50 °C, 85 °C. Kompensoidut Hall-anturit suoriutuivat testistä erinomaisesti koko lämpötilaskaalan yli suurimman poikkeaman ollessa puoli ampeeria. CLCE-01 antureilla sen sijaan poikkeama oli pahimmillaan noin 0,5 %, mikä on ampeereissa 10 A. Välillä 0 °C ... 85 °C V-vaiheen anturin poikkeama muuttui jopa 13 A. Poikkeaman voidaan olettaa johtuvan osittain signaalinkäsittelyelektronikasta ja osittain itse Hall-anturin ulostulojännitteen muutoksesta.

Nollapistepoikkeama koostuu monista eri komponenteista, joista osa vaikuttaa huomattavasti enemmän ja toiset vähemmän. Laskemalla vastusten toleranssit, operaatiovahvistinten sisääntulon nollapistevirheet ja Hall-antureiden datalehtien nollapistepoikkeamat yhteen saadaan:

$$I_{os} = I_{osHall} + I_{osG1} + I_{osG2} + I_{osOA}, \quad (29)$$

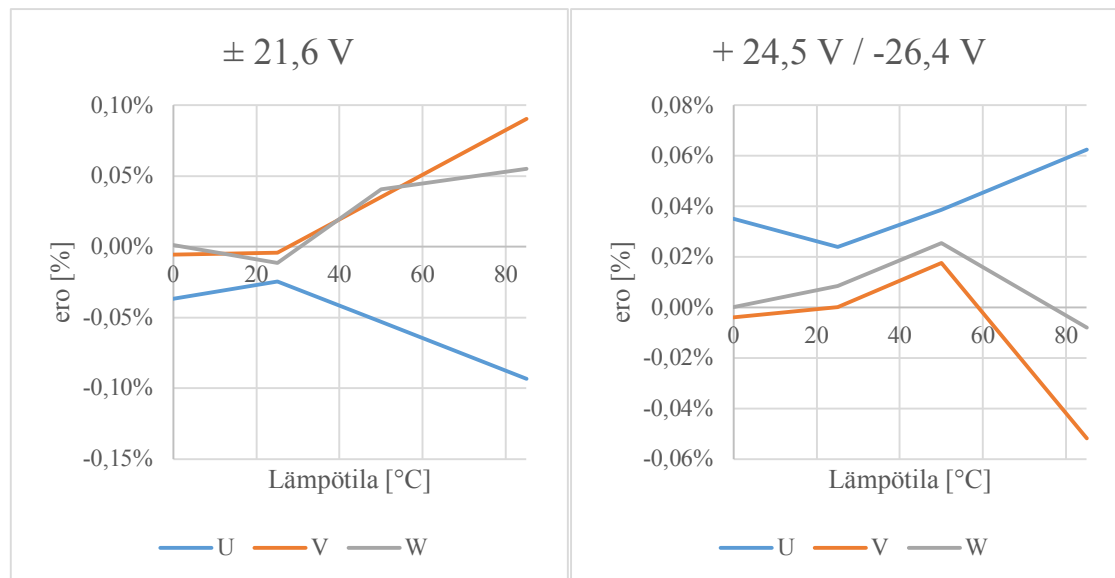
missä I_{os} on kokonaisnollapistepoikkeama ja I_{osHall} on Hall-antureiden aiheuttama nollapistepoikkeama. I_{osG1} ja I_{osG2} ovat kuvan 25 differentiaaliasteiden G1 ja G2 aiheuttamat poikkeamat ja I_{osOA} on bipolaaritransistoreita ajavan operaatiovahvistimen sisääntulon nollapistevirhe. Pelkästään Hall-antureiden datalehden mukainen virhe voisi aiheuttaa noin 30 ampeerin nollapistepoikkeaman käytetyllä mitta-alueella.

Allegron lähes vastaavan Hall-anturimallin nollapistepoikkeamaa tutkinut Henri Mustonen pääsi diplomityössään pienempään poikkeamaan, kuin CLCE-01 virranmittauskortti. Hän mittasi pelkkää anturin ulostulojännitettä, jolloin muu elektronikka ei vääristä mittaustulosta, kuten tässä työssä tekee. Kuvan 30 mukaisesti Mustosen mittaaman anturin ulostulojännitteen poikkeama välillä 0 °C ... 85 °C on suurimmillaan noin 1 mV verran sekä negatiiviseen, että positiiviseen suuntaan, mikä aiheuttaisi CLCE-01 kortilla 3 ampeerin muutoksen molempiin suuntiin. [19]



Kuva 30: Mustosen mittaaman Allegro A1363 Hall-anturin nollapistepoikkeama. Pystyakselilla on poikkeaman suuruus suhteessa käyttöjännitteeseen (5 V). Vaakakselilla lämpötila. [19]

Toinen muuttuja lämpötilan lisäksi oli käyttöjännite. Kompensoitujen Hall-anturien toimintaan käyttöjännite vaikutti erittäin vähän, suurimmillaan noin 50 mV. Kuvassa 31 esitettyjen CLCE-01 anturien näyttämät kuitenkin muuttuivat hieman enemmän käyttöjännitteen funktiona. Käyttöjännitteen vaikutus nollapistepoikkeamaan CLCE-01 anturilla ei ole kuitenkaan kohtuuttoman suuri, suurimmillaan 1,87 ampeeria, joten anturi suoriutui tältä osin kohtalaisen hyvin testistä.



Kuva 31: Käyttöjännitteen vaikutus nollapistepoikkeamaan. Anturien nimelliskäyttöjännite on ± 24 voltia. Käyrät kuvaavat käyttöjännitteen muutoksen vaikutusta anturin tuottamaan virtatietoon (nimelliskäyttöjännitteen näyttämän ja kuvan otsikon mukaisen käyttöjännitteen erotus suhteessa 2000 A).

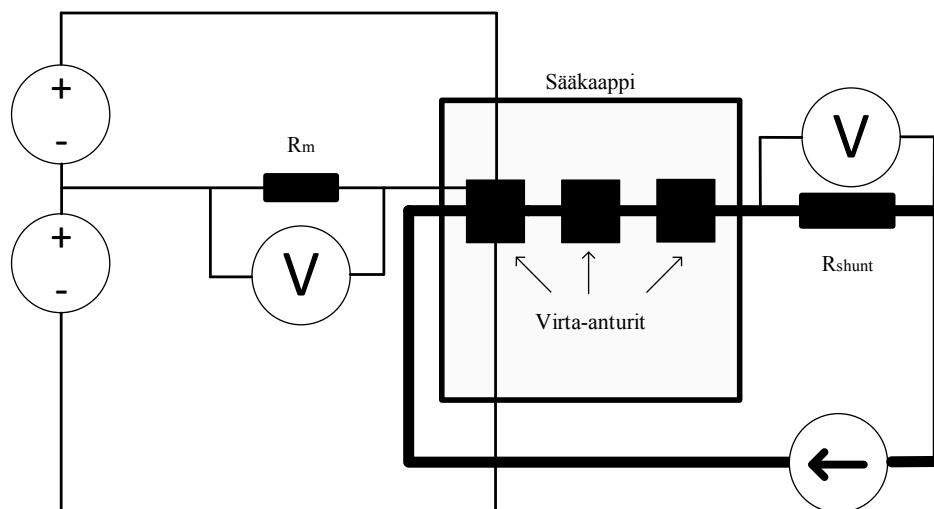
Käyttöjännitteen epäsymmetrian aiheuttama virhe virtatietoon johtunee yksinomaan signaalinkäsittelyelektronikasta. Hall-anturien tuottamiin jännitesignaaleihin käyttöjännitteiden muutos ei vaikuta mitenkään, koska CLCE-01 kortin käyttöjännitteistä tehdään tarkalla regulaattorilla viiden voltin käyttöjännite antureille. Regulaattorin lähtöjännite ei ole riippuvainen tulojännitteestä, kunhan se on suurempi kuin haluttu lähtöjännite. Tässä tapauksessa regulaattorin tulojännite on aina reilusti suurempi kuin lähtöjännite.

Saatujen mittaustulosten mukaan CLCE-01 anturin nollapistepoikkeama on siis useita ampeereita. Tämän poikkeaman saisi ainakin osittain pois tarkemmalla vastusten keskinäisellä mitoituksella. Ensimmäisessä vahvistinasteessa jouduttiin käyttämään tarkkuudeltaan 1 % vastuksia. Vastukset oli tosin valittu mittaamalla yleismittarilla, jolloin ne saatiin mahdollisimman lähelle oikeaa arvoa. Tarkoitus oli käyttää tarkkuudeltaan 0,1 % vastuksia, mutta niitä ei ollut saatavilla tarpeeksi nopealla aikataululla. Ero näissä on tarkkuuden lisäksi myös resistanssin muutos lämpötilan funktiona, mikä on tyypillisesti ainakin 4 kertaa suurempi tarkkuudeltaan 1 % vastuksissa, kuin 0,1 % vastuksissa. Näin ollen nollapistepoikkeama lämpötilan funktiona olisi voinut olla huomattavasti pienempi, jos olisi käytetty parempia vastuksia vahvistuksen asetukseen. Vishayn sovellusohjeessa lähteessä [21] on selitetty kuinka vastusten epäideaalisuudet vaikuttavat vahvistinten vahvistukseen. Ohje keskittyy lähinnä resistanssin arvon ajautumiseen ajan funktiona, mutta kokonaisvirheeseen on laskettu myös lämpötilasta aiheutuva virhe. Tarkkuudeltaan 0,1 % vastuksilla vahvistusvirhe voi olla jopa 0,4 %, ja ohjeessa onkin suositeltu käyttämään vastusmatriiseja (englanniksi array), joilla virhe jäisi siitä alle puoleen.

Myös kuvan 29 keltaisen käyrän kahdesta muusta eroavaa käytöstä voi selittää vastusten suuri lämpötilakerroin. Keltaisen käyrän virta-anturissa voi esimerkiksi differentiaalivahvistimen negatiivisentulon vahvistus kasvaa enemmän kuin positiivisen ja kahdella muulla anturilla taas toisinpäin. Virheen lähteen etsintä vaatisi kuitenkin jatkotutkimusta. Vastusmatriiseja tai vastusverkkoja olisi hyvä käyttää jatkossa.

5.3 Vahvistusvirhe

Vahvistusvirhetesteissä on tarkoitus selvittää virta-antureiden vahvistusvirhe. Luvussa 3.3.1 on kerrottu tarkemmin mitä vahvistusvirhe tarkoittaa ja luvussa 2.4 on laskettu sen vaikutus moottorin vääntömomenttiin. Vertailtavina antureina oli kolme kappaletta CLCE-01 kortteja ja kolme kappaletta kompensoituja Hall-antureita. Vertailukohtana käytettiin kaupallista sunttivastusta, koska sen tiedetään olevan tarkka. Kuva 32 esittää testissä käytettyä mittaustajajärjestelyä.



Kuva 32: Vahvistusvirhemittausten testauslaitteisto. Virtalähde syöttää sääkaapin läpi menevää kiskoa pitkin virtaa, jota mitataan mustilla neliöillä merkityillä virta-antureilla. Lisäksi virta mitataan referenssiksi kaapin ulkopuolella olevalla sunttivastuksella. Jännitelähteet vasemmalla tuottavat käyttöjännitteet virta-antureille.

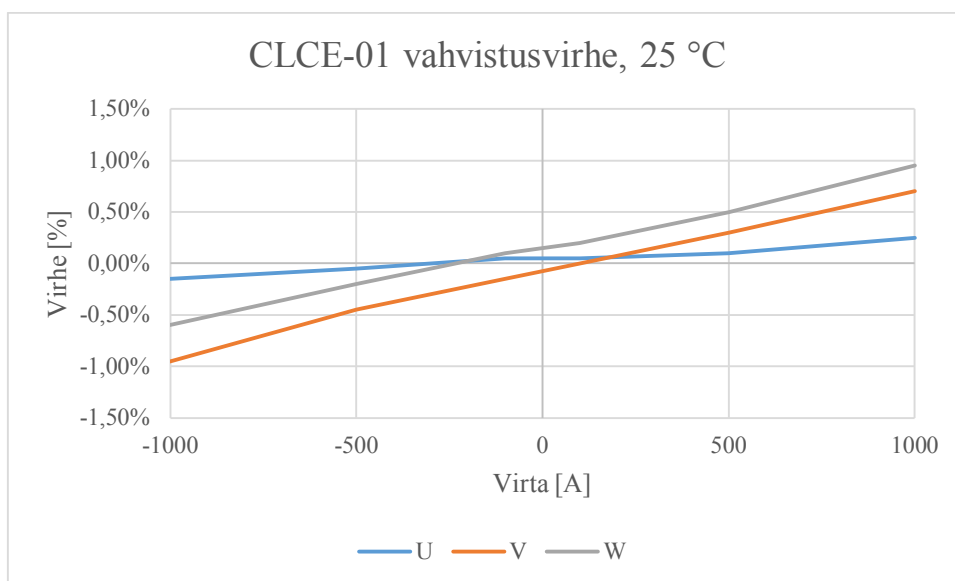
Virtalähteellä ajettiin kiskoa pitkin testattavien virta-antureiden ja sunttivastuksen läpi kuutta eri tasavirtaa: $\pm 100 \text{ A}$, $\pm 500 \text{ A}$, $\pm 1000 \text{ A}$. Testattavien antureiden virhe laskettiin yhtälöllä:

$$I_{\text{error}} = \frac{U_{R_m}}{R_m} \times 5000 - \frac{U_{\text{shunt}}}{R_{\text{shunt}}}, \quad (30)$$

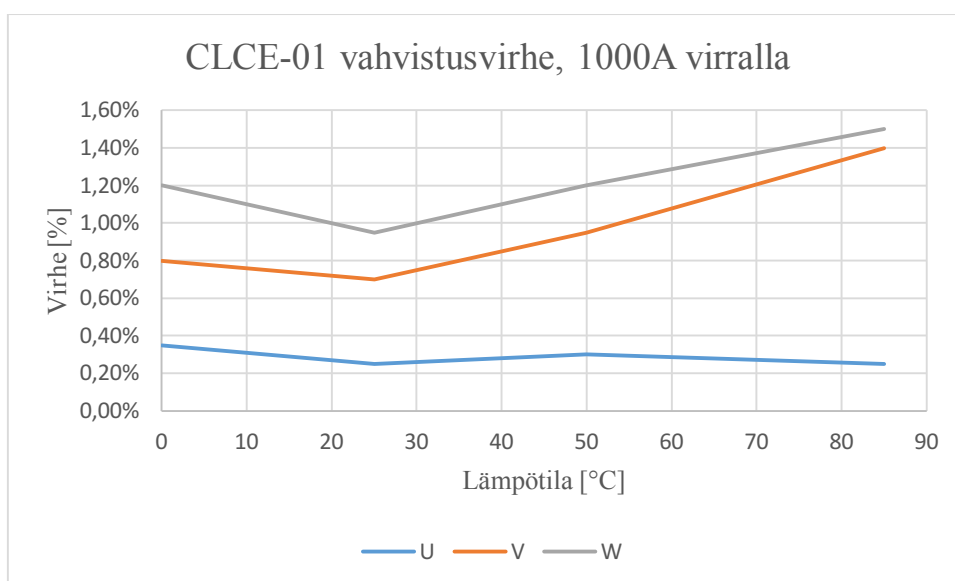
missä U_{shunt} on referenssinä käytettävän sunttivastuksen R_{shunt} yli oleva jännite ja U_{R_m} on testattavien virta-antureiden sunttivastuksen R_m yli oleva jännite. Testattavien antureiden näyttämä joudutaan kertomaan 5000, koska ne tuottavat virtasignaalin suhteessa 1:5000 ensiövirtaan verrattuna.

Kuten edellisessä luvussa, nollapistepoikkeamaa mitatessa, myös nyt muuttujia olivat käyttöjännitteet ja antureiden toimintalämpötila. Käyttöjännitteiden muutos välillä $\pm 21,6 \text{ V}$; $\pm 24 \text{ V}$ ja $+ 24,5 \text{ V} / - 26,4 \text{ V}$ ei vaikuttanut taaskaan merkittävästi CLCE-01:n eikä kompensoitujen Hall-antureiden näyttämään. Myöskään lämpötila ei vaikuttanut merkittävästi kompensoitujen Hall-antureiden näyttämään. Niillä suurin vahvistusvirhe oli luokkaa $0,1 \%$, mikä on hyvin linjassa datalehdessä ilmoitetun $0,4 \%$

kokonaistarkkuuden kanssa. CLCE-01 antureilla vahvistusvirhettä kuitenkin esiintyi ja näitä virheitä esittävät kuvat 33 ja 34.



Kuva 33: CLCE-01 vahvistusvirhe suhteessa 2000 A. Virhe on laskettu virran funktiona 25 asteen lämpötilassa. Kolme eri käyrää kuvaavat kolmen eri anturin näyttämien virhettä. Virheeseen sisältyy vahvistusvirheen lisäksi myös nollapistepoikkeama.



Kuva 34: CLCE-01 vahvistusvirhe suhteessa 2000 A. Virhe on laskettu lämpötilan funktiona 1000 A virralla. Kolme eri käyrää kuvaavat kolmen eri anturin näyttämien virhettä. Virheeseen sisältyy vahvistusvirheen lisäksi nollapistepoikkeama.

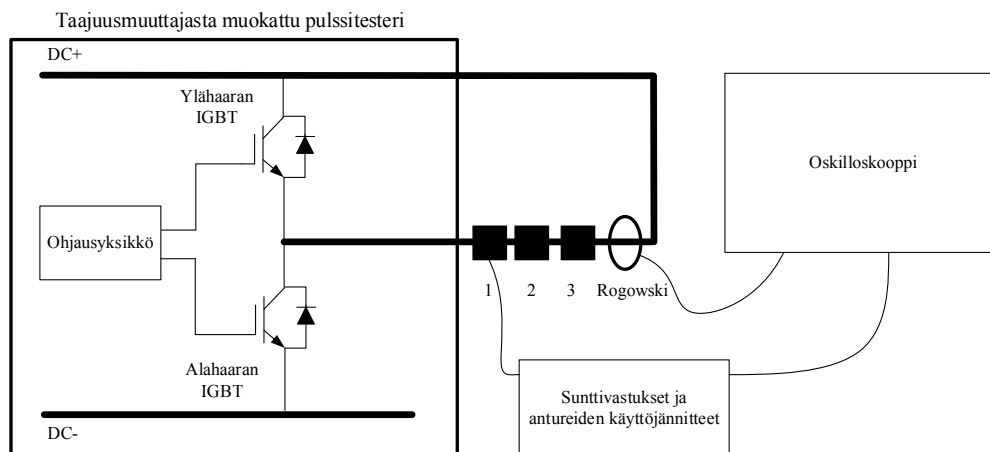
Kuva 33 esittää CLCE-01 anturin vahvistusvirhettä 25 °C lämpötilassa virran funktiona. Virhe on laskettu vähentämällä referenssinä käytetyn suuntivastuksen näyttämästä CLCE-01 anturin näyttämä ja suhteutettu 2000 A nimellisvirtaan. V- ja W-käyrät käyttäytyvät hyvin samankaltaisesti sillä erotuksella, että W-käyrällä on hieman enemmän nollapistepoikkeamaa. Tämä selittyy katsomalla edellisestä luvusta kuvaa 29, joka esittää antureiden nollapistepoikkeamaa. Siinä on antureiden välillä hyvin lähelle saman suuruinen nollapistepoikkeama läpi lämpötila-alueen. Molempiin kuviin 33 ja 34 sisältyy myös nollapistepoikkeama. Kuva 34 esittää vahvistusvirhettä 1000 A virralla läpi

lämpötila-alueen. Myös sen käyrät ovat hyvin lähelle samanmuotoisia kuin kuvan 29 nollapistepoikkeamaa esittävät käyrät, joten osa virheestä selittyy nollapistepoikkeamalla. U-vaiheen virhe on kuitenkin taas hyvin erilainen kuin kahden muun vaiheen. Se johtuu mahdollisesti samasta vastusten epätarkkuudesta kuin nollapistepoikkeamakin.

CLCE-01 antureiden vahvistusta olisi helppo muuttaa luvun 4.4 mukaisesti vaihtamalla vahvistinten G1 tai G2 vahvistusta. Kuvasta 33 voidaan havaita, että virhekäyrät ovat hyvin lineaarisia, joten vahvistusta pienentämällä saataisi helposti pienennettyä anturin kokonaisvirhettä. Jäljelle jäisi vielä ainakin lämpötilan funktiona muuttuva nollapistepoikkeama. Kuten luvussa 5.2 todettiin, nollapistepoikkeama lämpötilan funktiona voi johtua huonoista vastuksista. Näin ollen CLCE-01:n staattinen suorituskky olisi ehkä mahdollista saada huomattavasti tarkemmaksi pienillä muutoksilla.

5.4 Oikosulkutestit

Oikosulkutestissä on tarkoituksena tutkia anturien dynaamista suorituskkyä. Kuva 35 esittää testissä käytettyä järjestelmää. Kuvan mukaisesti taajuusmuuttajasta muokattiin pulssitesteri niin, että vain yhtä moottorin lähtövaihetta käytettiin ja itse moottoria ei ollut kytketty ollenkaan testeriin. Lähtövaihe voitiin kytkeä joko välipiirin positiiviseen tai negatiiviseen kiskoon niin, että niiden välille syntyi melko jäykkä oikosulku. Kaapeli oli kuitenkin noin 3 metriä pitkä, joten se sisältää vähän resistanssia ja induktanssia. Negatiivinen virtapulssi saatiin kytkemällä lähtövaihe välipiirin positiiviseen kiskoon ja ohjaamalla kuvan 35 alahaaran IGBT johtavaksi. Tällöin välipiirin positiivisen ja negatiivisen kiskon välisenä kuormana on vain kiskoista tuleva pieni induktanssi, sekä alahaaran IGBT:n johtotilanvastus. Näin ollen lähtökiskon virta kasvaa suurella nopeudella. Vastaavasti positiivinen virtapulssi saatiin kytkemällä lähtövaihe välipiirin negatiiviseen kiskoon.



Kuva 35: Oikosulkutestin järjestelmä. Mustat neliöt esittävät testattavia virta-antureita ja ellipsi esittää referenssinä käytettyä Rogowski-kelaa. Negatiivinen oikosulkuvirtapulssi saadaan sytyttämällä alahaaran IGBT johtavaksi. Positiivinen oikosulkuvirtapulssi taas saadaan kytkemällä moottorinlähtövaihe DC+-potentialiin sijaan negatiiviseen välipiiripotentialiin ja ohjaamalla sitten ylähaaran IGBT johtavaksi.

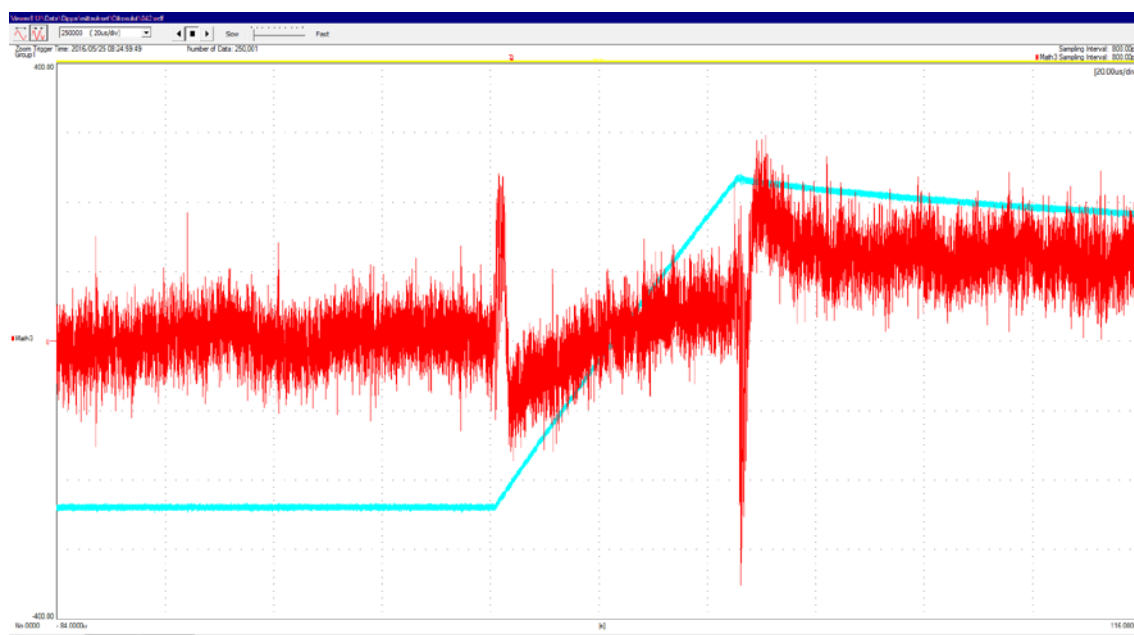
Liitteessä B kuvat B.1 ... B.8 esittävät virranmittauskäyriä, kun yllä esitellyllä järjestelmällä ajetaan suuren nousunopeuden virtapulsseja. Testit tehtiin kuudella eri

virran huippuarvolla: $\pm 1 \text{ kA}$ ja $\pm 6 \text{ kA}$. Jokaisessa kuvassa on referenssinä Rogowski-kelalla mitattu punainen käyrä ja kolme kappaletta sinisiä käyriä, jotka ovat testattavien antureiden mittaamia virtoja. Virran nousunopeudet ovat $\pm 1 \text{ kA}$ pulsseilla noin $\pm 56 \text{ A}/\mu\text{s}$ ja $\pm 6 \text{ kA}$ pulsseilla noin $\pm 133 \text{ A}/\mu\text{s}$.

Kompensoitujen Hall-anturien valmistaja lupaa datalehdessään virta-anturinsa reaktioajaksi alle puoli mikrosekuntia, kun virran nousunopeus on $200 \text{ A}/\mu\text{s}$. Vaikka liitteen B kuvissa aikaskaala on vähän liian epätarkka niin pienelle ajalle ja IGBT:n kytkennän aiheuttama häiriö vaikeuttaa kuvien tulkintaa, voidaan tarkkaan katsomalla todeta anturin täyttävän valmistajan lupaus. Allegro lupaa tyypilliseksi etenemisviiveeksi $2,2 \mu\text{s}$ kun anturiin kohdistuu 320 Gaussin , eli 32 mT askelmainen magneettivuon tiheys. Askeleen nopeutta ei kuitenkaan ole määritetty. $\pm 1 \text{ kA}$ pulssit vastaavat toteutetulla antureiden etäisyydellä noin 122 G magneettivuon tiheyttä ja $\pm 6 \text{ kA}$ pulssit vastaavat noin 731 G magneettivuon tiheyttä. Liitteen B kuvien perusteella voidaan todeta, että CLCE-01:n etenemisviive ylittää joskus $2,2 \mu\text{s}$. Outoa tuloksissa on, että suuremman nousunopeuden pulssiin CLCE-01 reagoi nopeammin kuin pienemmän nousunopeuden. Lisäksi positiiviseen suuntaan viiveet ovat pienempiä. Kaikkein huonoiten CLCE-01 selviää -1 kA pulssista, jossa kahdella käyrällä kestää noin $4 \mu\text{s}$ reagoida virtapulssiin. Mustonen on lähteessä [19] mitannut Allegron Hall-anturin etenemisviiveeksi $1,7 \mu\text{s}$, mutta hänellä on ilmeisesti ollut vain yhden kappaleen otos.

Etenemisviiveen hitaus siis johtune osittain signaalinkäsittelyelektronikasta. Tähän viittaa myös se, että positiiviseen virtaan CLCE-01 reagoi nopeammin kuin negatiiviseen. Jokaisessa CLCE-01:ssä on kaksi eripäin sijoitettua Hall-anturia, joten jos hitaus johtuisi pelkästään Allegron Hall-antureista, pitäisi olla käynyt todella suuri sattuma, että yhdelle CLCE-01:lle olisi kalustettu yksi hitaasti positiiviseen suuntaan reagoiva ja yksi hitaasti negatiiviseen suuntaan reagoiva. Kiinnostava jatkotutkimus olisi selvittää mikä osa signaalinkäsittelypiiristä aiheuttaa viiveen.

Kompensoidut Hall-anturit ovat myös tarkkuudeltaan parempia. Liitteen B kuvista voidaan huomata, että yhdellä CLCE-01:llä on selvästi suurempi vahvistus kuin toisilla. Tämä olisi kuitenkin luultavasti korjattavissa tarkemmilla vahvistuksenasetusvastuksilla, kuten aiemmissakin kappaleissa on todettu.

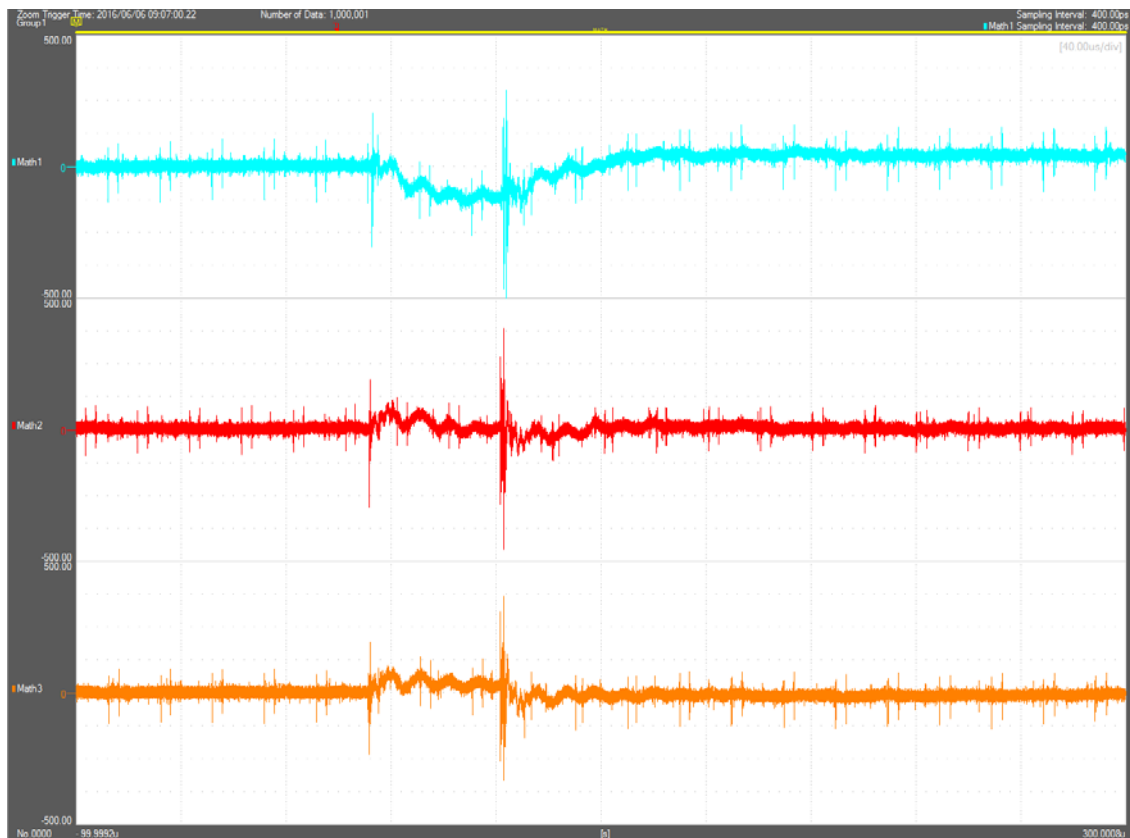


Kuva 36: CLCE-01 ero Rogowski kelaan + 6 kA pulssilla. Sininen käyrä on rogowski-kelalla mitattu virta ja punainen on samasta pulssista laskettu CLCE-01:n ja Rogowski-kelan erotus. Erokäyrän skaala on - 400 A ... + 400 A ja Rogowski-kelan skaala on - 1500 A ... 8000 A.

Kuvasta 36 nähdään tarkemmin CLCE-01:n dynaaminen suorituskky. Punainen käyrä on laskettu + 6 kA pulssista vähentämällä CLCE-01:n arvosta Rogowski-kelan arvo. Käyrässä on paljon korkeataajuisia häiriötä, mikä johtuu mittauksen vaikeudesta. Nollapistepoikkeama ennen pulssin alkua ei oikeasti vaihtelee ± 100 A välillä. IGBT:n kytkentähetkillä ero käy hetkellisesti jopa yli 300 ampeerissa. Keskellä nousukäyrää virtojen erotus on kuitenkin melko lähellä nollaa. Pulssin huipulla ero on noin 150 ... 200 A, mikä on hyvin linjassa edellisessä kappaleessa mitatun vahvistusvirheen kanssa.

5.5 Ylikuuluminen

Ylikuuluminen oletettiin luvussa 3.4 pahimmaksi häiriönlähteeksi magneettipiirittömälle Hall-anturille. Oikeanlaisella koteloinnilla kuitenkin todettiin olevan mahdollista pienentää häiriötä oleellisesti. Mittauslaitteistona käytettiin samanlaista pulssitesteriä, kuin edellisen luvun oikosulkuksissa. Nyt kuitenkin asennettiin jokaiseen moottorinlähtövaiheeseen virta-anturi, kuten oikeassa tuotteessa (eli taajuusmuuttajassa), toisin kuin oikosulkuksissa, missä kaikki kolme virta-anturia olivat peräkkäin yhdessä vaiheessa. Lähtövaiheet ovat anturien kohdalla suorassa rivissä järjestyksessä U, V, W. Ylikuuluminen mitattiin ajamalla noin 2300 A virtapulssi yhdestä moottorinlähtövaiheesta ja mittaamalla kahden muun vaiheen havaitsemaa virtaa. Virta näissä kahdessa muussa vaiheessa on siis oikeasti nolla. Lähtövaihe, josta ajetaan virtaa, on oikosuljettu jompaankumpaan välipiiripotentiaaliin, kuten kuvassa 35. Tällöin virran paluureitti ei ole kahden muun moottorinlähtövaiheen kautta. Testattavia antureita olivat CLCE-01 ja kaupalliset kompensoidut Hall-anturit.



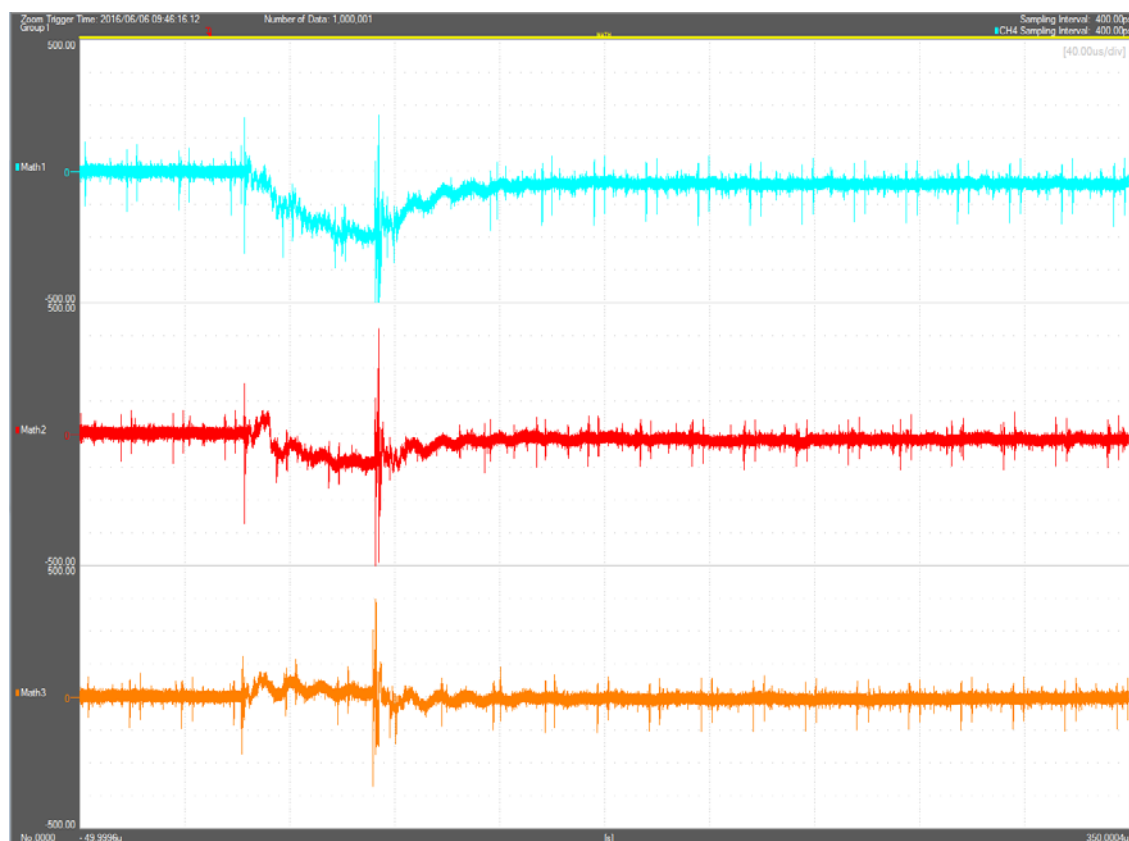
Kuva 37: Ylikuuluminen. Vaaka-akselilla on aika ja se on 400 μ s pitkä. Pystyakselin virtaskaala on -500 A ... 500 A. V-vaiheesta ajettiin nollasta noin 2300 ampeeriin noussut 50 μ s pitkä virtapulssi. W-vaiheen virta-anturin näyttämää mitattiin samalla. Sama toistettiin kolme kertaa eri virta-anturiyhdistelmillä. Ylin käyrä on CLCE-01 anturilla ilman koteloa, keskimmäinen CLCE-01 kotelon kanssa ja alin kompensoitu Hall-anturi ilman koteloa.

Kuva 37 esittää ylikuulumista vaiheesta V vaiheeseen W. Mittaus tehtiin kolme kertaa erilaisilla virta-anturiyhdistelmillä: CLCE-01 ilman koteloa, CLCE-01 koteloituna ja kompensoitu Hall-anturi ilman koteloa. Myös kompensoitu Hall-anturi testattiin koteloituna, mutta se ei enää pienentänyt mitattua häiriötä, joten käyrä näytti samalta kuin koteloimattomanakin. CLCE-01 anturin näyttämään kotelointi kuitenkin vaikutti huomattavasti. Kaikissa käyrissä näkyy säännöllinen 50 kHz häiriö, joka ei näy taajuusmuuttajan sisäisessä mittauksessa. Lisäksi IGBT:n päälle ja pois kytkentä aiheuttavat aina huomattavat häiriöt ulkoiseen mittaukseen, mutta ne eivät näy taajuusmuuttajan sisäisessä mittauksessa.

Kotelon materiaali oli kuumasinkittyä terästä: DX51D+Z275MAC. Kotelon paksuus oli 0,75 mm ja se oli kiinni taajuusmuuttajan rungon potentiaalissa.

Vertaamalla kuvan 37 keskimmäistä ja alinta käyrää voidaan todeta, että koteloituna CLCE-01 voi sietää magneettikentän ylikuulumista jopa yhtä hyvin kuin kaupallinen kompensoitu Hall-anturi. Kuvan 37 mittaus kuvaa kahden vierekkäisen vaiheen välistä ylikuulumista. Sen voisi luulla olevan huomattavasti suurempaa kuin kahden laitimaisen vaiheen välinen ylikuuluminen, koska etäisyys on suurempi ja näin ollen myös magneettikenttä on heikompi. Tässä nimenomaisessa taajuusmuuttajassa kuitenkin virtakiskot tekevät mutkan heti virta-antureiden paikan jälkeen ja kulkevat kaikki W-vaiheen virta-anturin ohi lähietäisyydeltä. Luultavasti tästä syystä suurin ylikuuluminen tuli ajaessa virtaa U-vaiheesta ja mitatessa W-vaihetta. Vastaavasti U-vaiheen virta-anturi

sijaitsee toisessa laidassa, eli muut kiskot eivät ohita sitä. Näin ollen myös häiriö oli pienintä juuri U-vaiheessa.



Kuva 38: Ylikuuluminen. Mittausjärjestely ja skaalat ovat samat kuin edellisessä kuvassa, mutta nyt virtaa ajetaan V-vaiheen sijaan U-vaiheesta.

Kuvan 38 esittämät käyrät on mitattu juuri samalla tavalla kuin kuva 37, mutta virtapulssi ajettiin V-vaiheen sijaan U-vaiheesta. Nyt koteloimaton CLCE-01 mittaa lähes -250 ampeerin virran W-vaiheessa, josta ei virtaa ajeta. Koteloidun CLCE-01:n häiriön amplitudi jää alle puoleen ja kaupallinen kompensoitu Hall-anturi mittaa pahimmillaan noin 50 ampeerin virran. Kotelointi auttaa siis tässäkin huomattavasti, mutta nyt suorituskky on hieman huonompi häiriönsiedon suhteen kuin kompensoidulla Hall-anturilla.

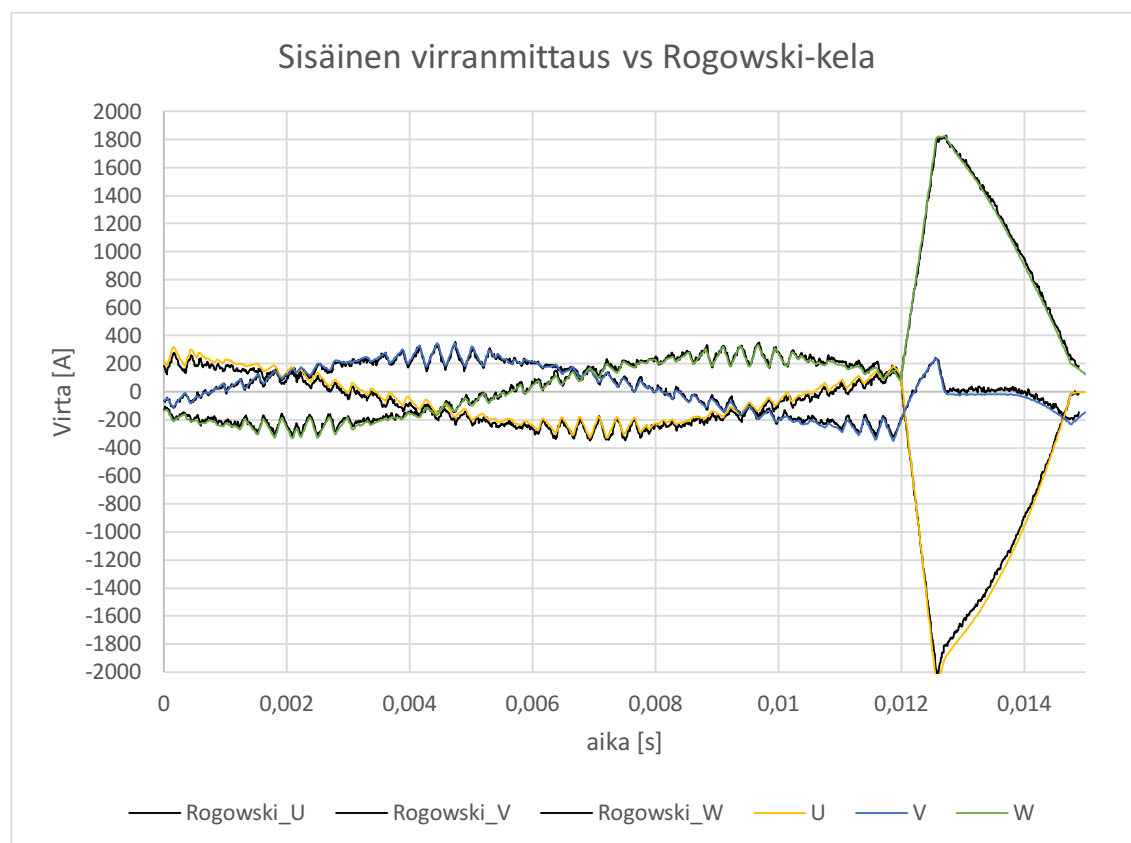
Näitä tuloksia ei pysty aivan suoraan vertaamaan luvussa 3.4 esitettyyn yksinkertaistettuun ylikuulumisen käyrään. Varsinkin kiskojen mutka tekee vertailusta monimutkaisemman, koska magneettikenttä kohdistuu antureihin hyvin erilaisissa kulmissa. Kiskot kuitenkin menevät lähimmillään noin 5 cm toisten vaiheiden antureista, ja yksinkertaistetun teorian mukaan sen pitäisi aiheuttaa voimakkuudeltaan noin 330 A häiriö. Tämä on hyvin linjassa mitatun – 250 A häiriön kanssa.

CLCE-01-anturit olivat todella häiriöherkkiä ulkoisille magneettikentille, kuten etukäteen oletettiin. Koteloimalla kuitenkin saatiin huomattavasti pienennettyä häiriötä ja osassa mittauksista häiriöt saatiin jopa yhtä matalalle tasolle kuin kaupallisella kompensoidulla Hall-anturilla. Kotelot eivät olleet juuri näille antureille suunniteltuja, joten ne piti muokata sopimaan anturin dimensioihin. Muokkauksen takia koteloihin jäi paljon rakoja, jotka voivat huonontaa niiden antamaa suojaa. Täysin yhteensopivilla koteloidilla olisi siis ehkä päästy jopa parempiinkin tuloksiin.

Vaarana koteloinnissa on, että se vaikuttaa myös hyötymagneettikenttään. Toisin sanoen se voi muuttaa mitattavasta kiskosta syntyvää anturiin vaikuttavaa magneettikenttää kotelon sisällä. Normaalisti magneettikenttä olisi pyöreän kiskon ympärillä pyöreä, mutta käytetyt kotelot olivat neliskulmaisia. Hall-anturit olivat kuitenkin noin 9 mm päässä kiskosta, kun taas koteloon oli kiskosta matkaa vähintään 4 cm. Kotelon vaikutusta mitattuun virtaan ei tutkittu, mutta ainakaan suurta eroa se ei tehnyt. Tämä olisi kuitenkin yksi kiinnostava jatkotutkimuksen aihe. Simuloimalla saisi varmasti hyvän käsityksen kotelon vaikutuksesta, mutta se jätettiin tämän työn ulkopuolelle. Luultavasti pyöreä kotelo tuottaisi parhaan suojan ja vääristymättömimmän magneettikentän sisällään.

5.6 Antureiden käyttö vaihtosuuntaajassa

Erään vaihtosuuntaajan kompensoidut Hall-virta-anturit korvattiin CLCE-01-virta-antureilla. Anturit kotelointiin samoilla keloilla, joita edellisessä luvussa käytettiin ylikuulumisen vaimentamiseksi. Lisäksi vaihevirrät mitattiin Rogowski-keloilla vaihtosuuntaajan ulkopuolelta vaihekiskoista. Moottoria ajettiin skalaariohjauksella noin 70 hertsin taajuudella. Kesken ajon pakotettiin ohjelmallisesti U-vaiheen alahaaran IGBT johtavaan tilaan niin pitkäksi aikaa, että vaihtosuuntaajan ylivirtasuojaukset laukesi ja sammutti siis kaikki IGBT:t. Ylivirtasuojauksen laukeamisen takia vaihtosuuntaaja tallensi tiedon virtakäyrästä laukeamishetken tienoilla. Rogowski-kelojen mitaamat virrat tallennettiin oskilloskoopilla. Näin vaihtosuuntaajan mitaamia ja Rogowski-keloilla mitattuja virtoja voitiin jälkikäteen verrata toisiinsa.



Kuva 39: Vaihtosuuntaajan sisäisen virranmittaus CLCE-01-virta-antureilla ja vertauksena samat virrat mitattuna Rogowski-kelalla. Mustat käyrät ovat Rogowski-kelalla mitattuja ja keltainen, vihreä ja sininen ovat vaihtosuuntaajan sisäisen virranmittauksen käyriä.

Kuva 39 esittää vaihtosuuntaajan moottorilähdön vaihevirtoja. Mustat käyrät ovat referenssinä käytettyjen Rogowski-kelojen mittaamia virtoja. Keltainen, sininen ja vihreä ovat vaihtosuuntaajan CLCE-01 virta-antureilla mitaamat vaihevirrat. Virtakäyrät vastaavat melko hyvin toisiaan, mutta U-vaiheen mittauksissa on havaittavissa tälläkin skaalalla pientä poikkeamaa. Kuvaa tarkemmin tutkimalla voidaan huomata, että virhe verrattuna Rogowski-kelaan on melko epämääräinen: ensimmäisen neljän millisekunnin aikana se on noin + 30 ampeeria, vaikka ajanjaksoon sisältyy sekä osittain positiivinen, että osittain negatiivinen puolijakso. Negatiivisen puolijakson keskellä ero on enää noin + 10 ampeeria, ja negatiivinen ylivirtapiikki on noin – 50 ampeeria verrattuna Rogowski-kelaan. Virhe voi siis olla joko epälineaarinen tai yhdistetty nollapistepoikkeama ja vahvistusvirhe tai anturin kokemista häiriöistä, kuten ylikuulumisesta johtuva. Kyseessä on kuitenkin U-vaihe, jonka edellisessä luvussa todettiin häiriytyvän vain vähän muiden vaiheiden virroista. Nollapistepoikkeaman taas pitäisi nollautua, kun virta-anturit kalibroidaan ennen moottorin käynnistystä. Toisaalta luvussa 5.2 mitattiin nollapistepoikkeaman muuttuvan myös lämpötilan funktiona, joten anturi on voinut ehtiä lämmitä kalibroinnin jälkeen moottoria ajettaessa. Kuvaa 39 on leikattu mittakäyristä vain osa, jotta kuva olisi selkeämpi. Sammutuksen jälkeinen mittatieto, jota ei kuvassa rajauksen takia näy, osoittaa kuitenkin, että U-vaiheen nollapistepoikkeama on vain noin 2 ampeeria. Näin ollen virhe siis johtunee vahvistusvirheestä, epälineaarisuudesta tai häiriöistä, tai näiden kaikkien summasta.

Kaikki korkeataajuiset kytkentähäiriöt kuitenkin poistuivat CLCE-01:n mittauskäyristä taajuusmuuttajan sisäisen mittauksen myötä. Lukujen 5.4 ja 5.5 mittauksissa näitä häiriöitä esiintyi, koska käyrät oli mitattu ulkoisesti oskilloskoopilla. Osittain häiriöttömyys johtuu myös mittasignaalin suodattuksesta.

5.7 Mittausten yhteenveto

Magneettipiirittömän CLCE-01-Hall-anturikortin tarkkuus ei yltänyt kaupallisen kompensoidun Hall-anturin tarkkuuteen. Nollapistepoikkeamaa CLCE-01:llä oli huoneen lämmössä noin 5 ampeerin verran ja lämpötilan funktiona virhe muuttui jopa 13 ampeeria. Kompensoiduilla Hall-antureilla sen sijaan poikkeama pysyi koko lämpötila-alueen läpi alle sadan milliampeerin.

CLCE-01:n kokonaisvirhe huoneenlämmössä oli noin 20 ampeeria 1000 A virralla, eli noin 1 % suhteutettuna 2000 A nimellisvirtaan. Suurimmillaan 85 °C lämmössä se oli noin 1,5 %. Näihin sisältyy siis nollapistepoikkeama ja vahvistusvirhe. Hyvää vahvistusvirheessä oli, että se oli lineaarinen koko virtaskaalalla. Näin ollen tarkemmin mitoitettulla anturin sisäisellä vahvistuksella vahvistusvirheen voisi saada lähes nollaan. Vahvistusvirhe muuttui myös jonkin verran lämpötilan funktiona kuten nollapistepoikkeamakin. Myös vahvistusvirheen lämpötilariippuvuutta voisi parantaa tarkemmilla vastuksilla ja lämpötilan kompensoinnilla. Vastusverkkojen tai vastusmatriisien käyttö parantaisi varmasti tarkkuutta.

Dynaamisilta ominaisuuksiltaan CLCE-01 ei aivan vastannut kompensoitua Hall-anturia. Virran nopeissa muutostilanteissa CLCE-01:n signaalissa saattoi esiintyä pientä ylitystä tai alitusta ja etenemisviive oli selvästi suurempi kuin kompensoidulla Hall-anturilla. Dynaamisuuden erot kuitenkin esiintyivät mikrosekuntien aikatasolla, joten yleisesti käytetyllä 50 hertsin taajuudella hitauden ei pitäisi vaikuttaa juurikaan suorituskykyyn. Jatkokehityksen kannalta olisi kuitenkin kiinnostavaa tutkia tarkemmin mistä dynaamisuuden erot johtuvat: Hall-antureista, vai jostakin vahvistinasteista.

Ylikuulumista tutkittaessa huomattiin, että koteloimattomana CLCE-01 on todella häiriöherkkä. Koteloituna ylikuuluminen väheni merkittävästi, mutta ei kuitenkaan aivan saavutettu kaupallisen kompensoidun Hall-anturin ylikuulumisensietotasoa. Kotelon vaikutusta hyötymagneettikenttään tulisi tutkia lisää, koska ei voida olla varmoja vaikuttiko neliskulmainen kotelo anturin magneettikenttään.

Vaihtosuuntaajakäytössä CLCE-01-antureiden tuottama ja taajuusmuuttajassa sisäisesti suodatettu virtasignaali näyttää Rogowski-kelan mittaamaan signaaliin verrattuna hyvältä. Ylikuulumista ei ole havaittavissa ja dynaamisuus näyttää riittävältä nopeassa ylivirtatilanteessakin. Erityisesti yhdellä vaiheella on kuitenkin havaittavissa mittavirhettä verrattuna Rogowski-kelaan. Tätä virhettä voisi saada ainakin pienennettyä asettamalla korttien vahvistuksen tarkemmilla vastuksilla.

Taulukko 1: CLCE-01 suorituskyky.

	CLCE-01
Kokonaistarkkuus (@ 1000A)	$\pm 1,5 \%$
Nollapistepoikkeama	$\pm 0,65 \%$
Etenemisviive	4 μs

Taulukko 1 esittää CLCE-01:n suorituskyvyn kolme tärkeää mittaria. Yleisesti kortin tarkkuutta voisi parantaa pienentämällä virranmittausaluetta. Jos kuitenkin halutaan mitata myös suurta virtaa, voitaisi kokeilla luvussa 4.4 esiteltyä mittaustapaa, jossa yksi anturipari mittaa $\pm 2 \text{ kA}$ virta-alueen ja tämän ylittyessä analoginen kytkin vaihtaa signaalin tulemaan toiselta anturiparilta, jonka alue yltää $\pm 6 \text{ kA}$ saakka. Edellä mainitun tavan suorituskykyä ei kuitenkaan ehditty mitata tässä työssä, mutta se olisi kiinnostava jatkotutkimuksen kohde.

Pienillä parannuksilla CLCE-01 voisi saavuttaa moottorinsäätöön tarvittavan suorituskyvyn. Mittausten perusteella voidaan todeta, että CLCE-01 ei saavuttanut kompensoidun Hall-anturin suorituskykyä ja tarkkuus ei riittäne DTC-säätömenetelmään. Skalaariohjauksella moottoria kuitenkin ajettiin. Tällaisenaan CLCE-01 voisi sopia johonkin hieman matalampaa suorituskykyä vaativaan sovellukseen.

6 Yhteenveto

Työssä suunniteltiin taajuusmuuttajaan virranmittausanturi magneettipiirittömällä Hall-anturilla. Lähtökohtaisesti kompensoitu Hall-anturi on virranmittauksessa suorituskyvyltään huomattavasti parempi kuin magneettipiiritön Hall-anturi. Yksinkertaisemman ja halvemmän rakenteen takia tutkittiin olisiko mahdollista korvata kompensoidut Hall-anturit magneettipiirittömällä Hall-antureilla. Tavoite oli saavuttaa sama suorituskky kuin eräällä kaupallisella kompensoidulla Hall-anturilla. Myös muita virranmittausmenetelmiä esiteltiin työssä pintapuolisesti, mutta pääpaino oli Hall-antureihin perustuvissa menetelmissä.

Sähkömagnetismin lakeja soveltamalla laskettiin antureille etäisyydet virtakiskosta. Virranmittauskortin ulostulosignaalin oli oltava yhteensopiva kaupallisten kompensoitujen Hall-antureiden kanssa. Näin ollen virranmittauskortille suunniteltiin signaalinkäsittelyelektroniikka, joka muuttaa Hall-anturin jännitesignaalin ensiövirtaan suoraan verrannolliseksi virtasignaalksi. Erilaisten signaalinkäsittelypiirien hyviä ja huonoja puolia vertailtiin. Myös anturiin kohdistuvia häiriöitä ja niiden suodatusta esiteltiin.

Mittauksissa selvitettiin itse suunnitellun magneettipiirittömän Hall-anturin, CLCE-01:n, ja kaupallisen kompensoidun Hall-anturin staattista ja dynaamista suorituskkyä sekä ulkoisen magneettikentän häiriönsietokykyä. Staattisen suorituskvyn mittauksissa muuttujina olivat ympäristön lämpötila, mitattava virta sekä anturin käyttöjännitteet. 1000 ampeerin virralla lämpötila-alueella 0 °C ... 85 °C CLCE-01 pääsi 1,5 % tarkkuuteen suhteessa 2000 A nimellisvirtaan kun taas kompensoitu Hall-anturi pääsi 0,1 % tarkkuuteen. Käyttöjännitteiden muutos ei vaikuttanut juurikaan mittaustuloksen virheeseen. Nollapistepoikkeamaa CLCE-01:llä oli pahimmillaan 10 ampeeria 0 °C ... 85 °C lämpötila-alueella kun taas kompensoidulla Hall-anturilla suurin virhe oli puoli ampeeria. Lämpötilankompensoinnilla voisi saada pienennettyä niin nollapistepoikkeaman, kuin vahvistusvirheenkin lämpötilariippuvuutta.

Myös dynaaminen suorituskky oli kompensoidulla Hall-anturilla parempi kuin CLCE-01:llä. Nopeassa virranmuutostilanteessa kompensoidulla Hall-anturilla ei esiintynyt viivettä eikä ylitystä vasteessa. CLCE-01:llä sen sijaan oli hieman viivettä ja ylitystä. Jatkotutkimuksena olisi kiinnostava selvittää johtuuko etenemisviive jostakin vahvistinasteista vai Hall-antureista.

Fyysiseltä kooltaan CLCE-01 oli pienempi kuin kaupallinen kompensoitu Hall-anturi ja ilman kiinnityksen yhteensopivuuden vaatimusta anturi olisi saatu mahtumaan vielä huomattavasti pienempään tilaan. Kokonsa puolesta CLCE-01 olisi siis paljon parempi kuin kaupallinen. Myös hinnan puolesta magneettipiiritön Hall-anturi on parempi kuin kompensoitu, koska anturissa ei tarvita magneettipiiriä ja kompensointikäymistä.

Magneettipiirittömän Hall-anturin pahimmaksi virhetekijäksi epäilty magneettikentän ylikuuluminen viereisistä virtakiskoista osoittautui mittauksissa aiheuttavan jopa satojen ampeerien virheen. Ylikuulumista saatiin kuitenkin todella tehokkaasti suodatettua rautakoteloinnilla. Koteloituna CLCE-01:n suorituskky pääsi jo lähelle kompensoidun Hall-anturin suorituskkyä ylikuulumisen sietokvyn osalta. Kotelon vaikutus mitattavaan hyötykenttään olisi kuitenkin kiinnostava jatkotutkimuksen kohde.

Vaihtosuuntaajassa käytettynä CLCE-01 käyrämuotoja verrattiin Rogowski-keloilla mitattuihin virtoihin. Kuvaajasta pystyttiin tulkitsemaan, että ylikuuluminen ja dynaamisuus eivät ole ongelma vaihtosuuntaajakäytössä, mutta vahvistusvirhettä on hieman liikaa. Anturin tarkkuutta pystyttäisi todennäköisesti parantamaan käyttämällä

tarkempia vastuksia vahvistuksen asetukseen. Lisäksi pienentämällä mitta-aluetta voisi anturin tarkkuus parantua. Nämä olisivat kiinnostavia jatkotutkimuksen kohteita.

Kokonaisuutena tässä työssä suunniteltu magneettiipiiritön Hall-anturi jäi suorituskyvyltään huomattavasti kaupallisesta kompensoidusta Hall-anturista. Tulokset olivat kuitenkin lupaavan suuntaisia ja luultavasti suorituskkyä pystyttäisi parantamaan merkittävästi. Lisäksi halvempi hinta ja pienempi koko kompensoituun Hall-anturiin verrattuna tekevät tästä kiinnostavan jatkokehityskohteen.

Lähdeluettelo

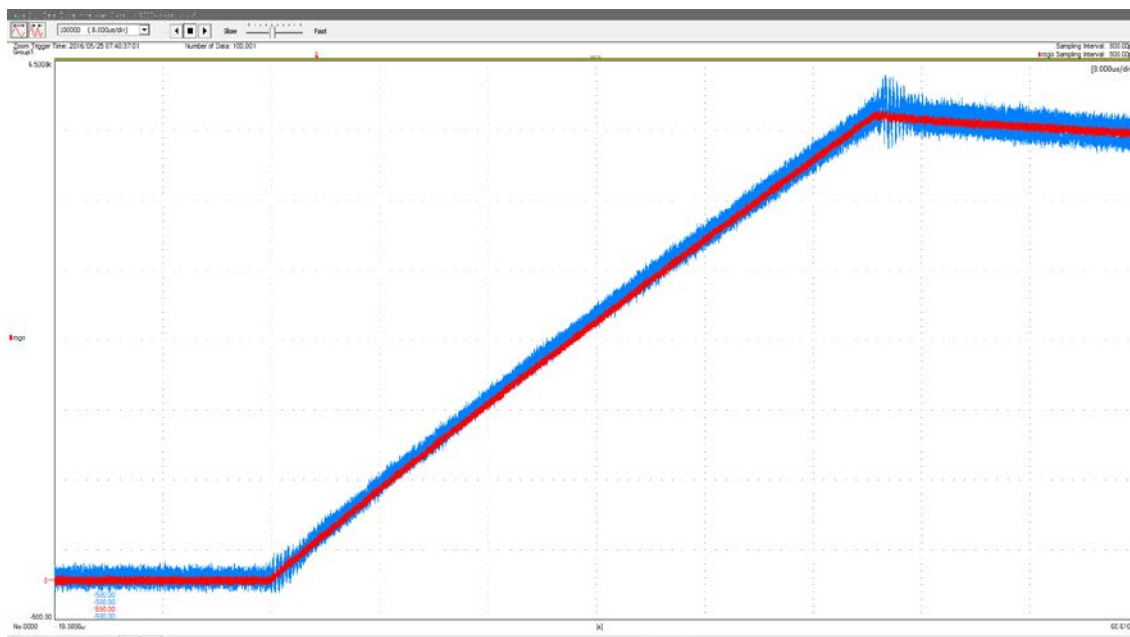
- [1] J. Niiranen, Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus, Helsinki: Tekijä ja Oy Yliopistokustannus/Otatieto, 1999, pp. 13, 39 - 48, 255 - 256.
- [2] J. Kyyrä, Kurssin S-81.3110 Suuntaajatekniikka luentomoniste, Espoo, 2008.
- [3] J. Niiranen, Tehoelektroniikan komponentit, Helsinki: Otatieto, Gaudeamus Helsinki University Press, 2007, pp. 89-91, 99-101, 193-194.
- [4] O. Niiranen, Suntain käyttö virta-anturina raskaissa työkonesähkökäytöissä, Diplomityö, Espoo: Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulu, 2013, pp. 7.
- [5] J. Luomi ja A. Niemenmaa, Kurssin s-17.2020 Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt luentomoniste, Espoo, 2011.
- [6] L. Harnefors, M. Hinkkanen, O. Wallmark ja A. G. Yepes, "Control of Voltage-Source Converters and Variable Speed Drives", Kurssin S-81.3300 Control of electric Drives luentomoniste.
- [7] G. S. Buja ja M. P. Kazmierkowski, "Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors - a survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, osa/vuosik. 51, nro 4, pp. 744-757, 2004.
- [8] L. Laurila, Analysis of torque and speed ripple producing non-idealities of frequency converters in electric drives, Väitöskirja, Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2004.
- [9] I. Takahashi ja T. Noguchi, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, osa/vuosik. IA 22, nro 5, pp. 820-827, 1986.
- [10] J. Vanderlinde, Classical electromagnetic theory, Boston: Dordrecht: Kluwer Academic, 2004, pp. 19-21.
- [11] Honeywell, "Hall Effect Sensing and Application," Freeport, Illinois, pp. 3-9.
- [12] E. Ramsed, Hall-Effect Sensors, Newnes, 2011, pp. 1-10, 69-71.
- [13] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. H.-C. Iu ja L. J. Borle, "Current Sensing Techniques: A Review," *IEEE Sensors Journal*, osa/vuosik. 9, nro 4, pp. 354 - 376, 2009.
- [14] LEM, Isolated current and voltage transducers characteristics - applications - calculations (3rd edition), http://www.lem.com/images/stories/files/Products/P1_5_1_industry/CH24101E.pdf, LEM.
- [15] Allegro Microsystems, "Komponentin A1366 datalehti, <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A1366-Datasheet.ashx?la=en>," Worcester, Massachusetts, 2014.

- [16] Electric Power Research Institute,, Handbook of shielding principles for power system magnetic fields - Volume 1: Introduction and application, Lenox, Massachusetts, 1994, s. 2-7 - 2-13, 2-21 - 2-23, 3-2 - 3-5, 6-6 - 6-17.
- [17] I. Reitmaa ja J. Gustafsson, Varma Digitaalielektroniikka - EMC-, vienäehkäisy- ja häiriötorjuntatekniikkaa, Tampere: Otatieto Oy, 1996, s. 64 - 66.
- [18] International Standard, IEC 61800-5-1, 2007.
- [19] H. Mustonen, Virtakiskon virran mittaaminen avoimen magneettipiirin Hall-anturilla, Diplomityö, Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, 2015.
- [20] Electronics Tutorials, ”Amplifier Classes, <http://www.electronicstutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>”.
- [21] Vishay, ”Increasing Accuracy in Feedback Circuits and Voltage, <http://www.vishay.com/docs/28194/increarr.pdf>,” Vishay, 2012.
- [22] Power Electronics Measurements Ltd., ”CWT LF Specification, http://www.pemuk.com/Userfiles/CWTlf/cwtlf_1110.pdf,” Nottingham, U.K..

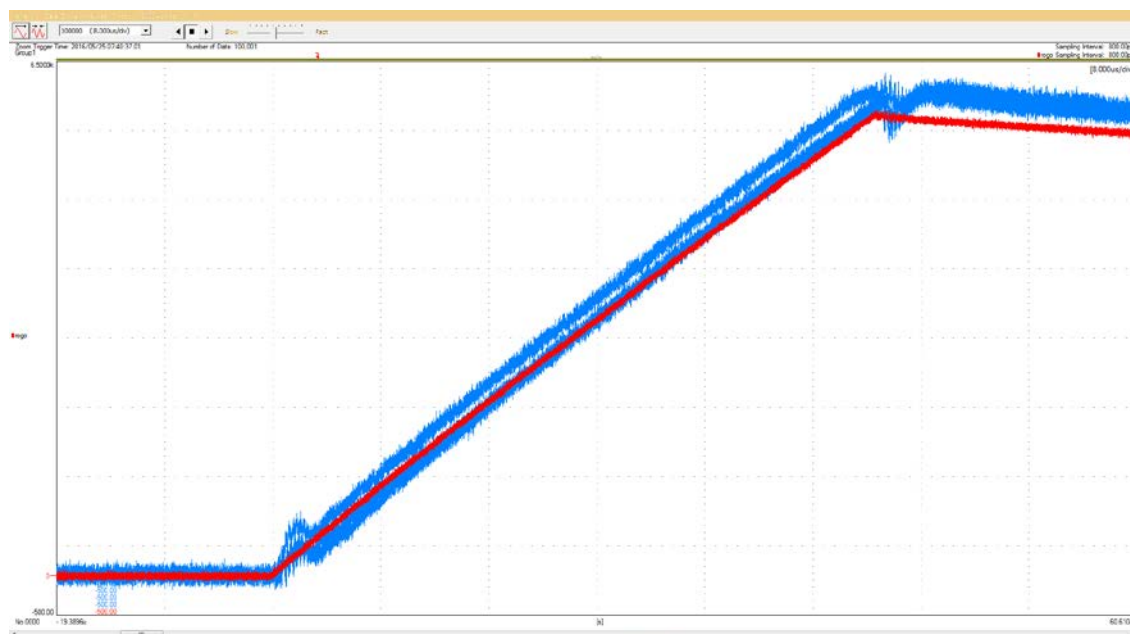
Liite A

Mittalaitteen tyyppi	Valmistaja / Malli	Muuta
Rogowski-kela; 0,5mV/A [22]	PEM CWT60LF	Käytettiin luvun 5.4 oikosulkutesteissä.
Rogowski-kela; 1mV/A [22]	PEM CWT30LF	Käytettiin luvun 5.6 vaihtosuuntaajan mittauksissa.
Oskilloskooppi	Yokogawa DL9140L	Käytettiin luvun 5.4 oikosulkutesteissä.
Oskilloskooppi	Yokogawa DL6104	Käytettiin luvun 5.6 vaihtosuuntaajan mittauksissa.
Jännitelähde	Tti EL302Tv Triple power supply	Käytettiin lukujen 5.2 ja 5.3 mittauksissa virta-antureiden käyttöjännitelähteenä.
Yleismittari	Fluke 87V True RMS multimeter	Käytettiin luvun 5.3 mittauksissa sunttivastuksen jännitteen mittaukseen. Lisäksi käytettiin luvun 5.2 mittauksissa testattavien virta-antureiden mittasignaalin sunttivastuksen jännitteen mittaukseen.
Yleismittari	Fluke 87 True RMS multimeter	Käytettiin luvun 5.3 mittauksissa testattavien virta-antureiden mittasignaalin sunttivastuksen jännitteen mittaukseen.
Sunttivastus; 10Ω; 0,01 %	Vishay VPR221T10R0000TB	Käytettiin lukujen 5.2 ja 5.3 mittauksissa virta-antureiden toisiovirran sunttina (2 kappaletta rinnankytkettynä).
Sääkaappi	Espec SH-642	Käytettiin lukujen 5.2 ja 5.3 mittauksissa virta-antureiden ympäristön lämpötilan asetukseen.
Virtalähde; 10V; 1000A	TDK-Lambda GEN 10-1000	Käytettiin luvun 5.3 mittauksissa virtalähteenä.

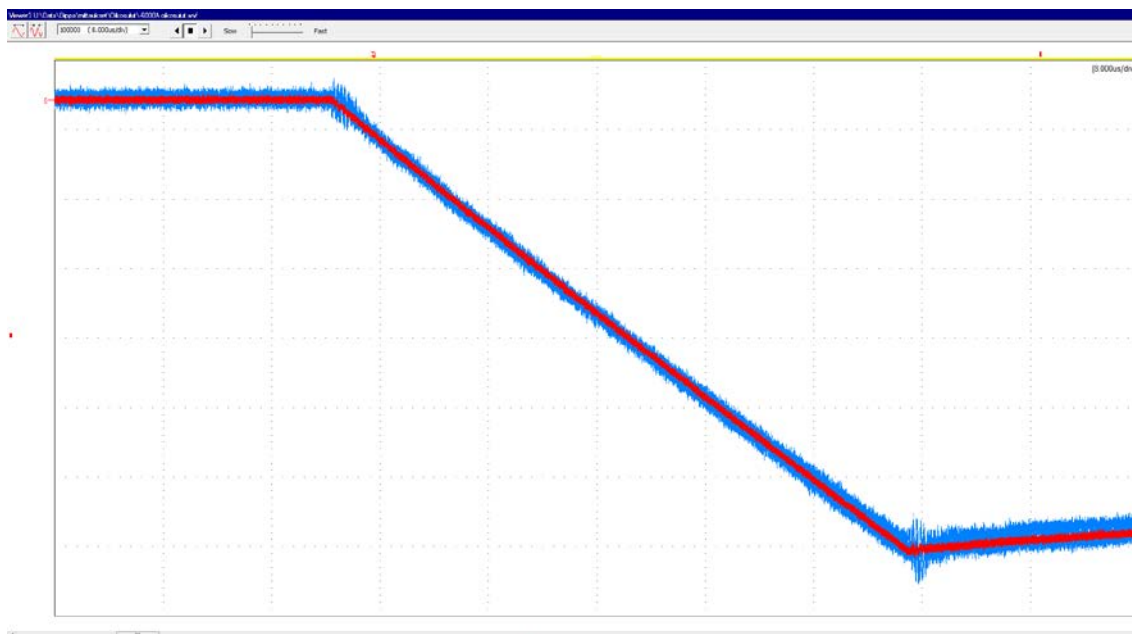
Liite B



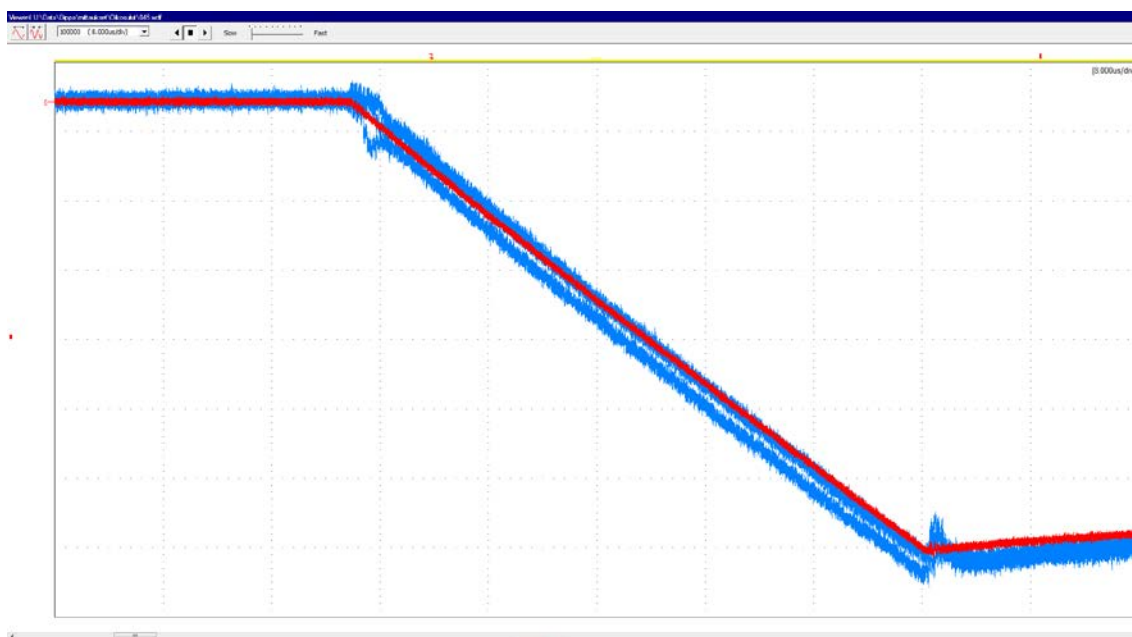
Kuva B.1: + 6 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat kompensoitujen Hall-anturien mittaamat virrat. Nousevan reunan pituus on 45 µs.



Kuva B.2: + 6 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat CLCE-01 virta-anturien mittaamat virrat. Nousevan reunan pituus on 45 µs.



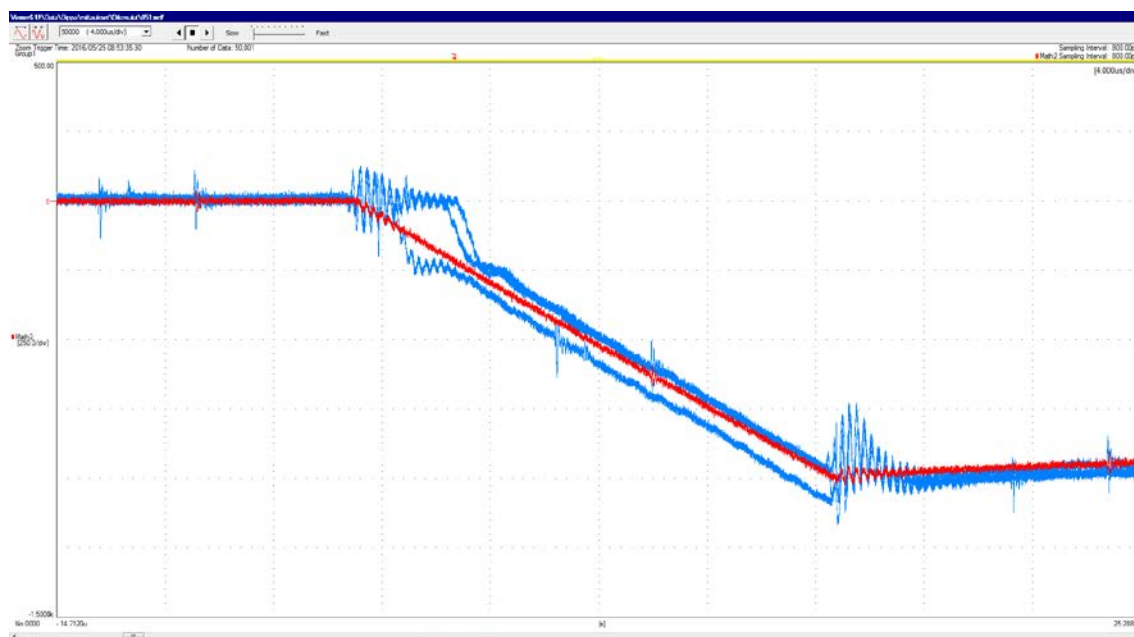
Kuva B.3: - 6 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat kompensoitujen Hall-anturien mittaamat virrat. Laskevan reunan pituus on 45 μ s.



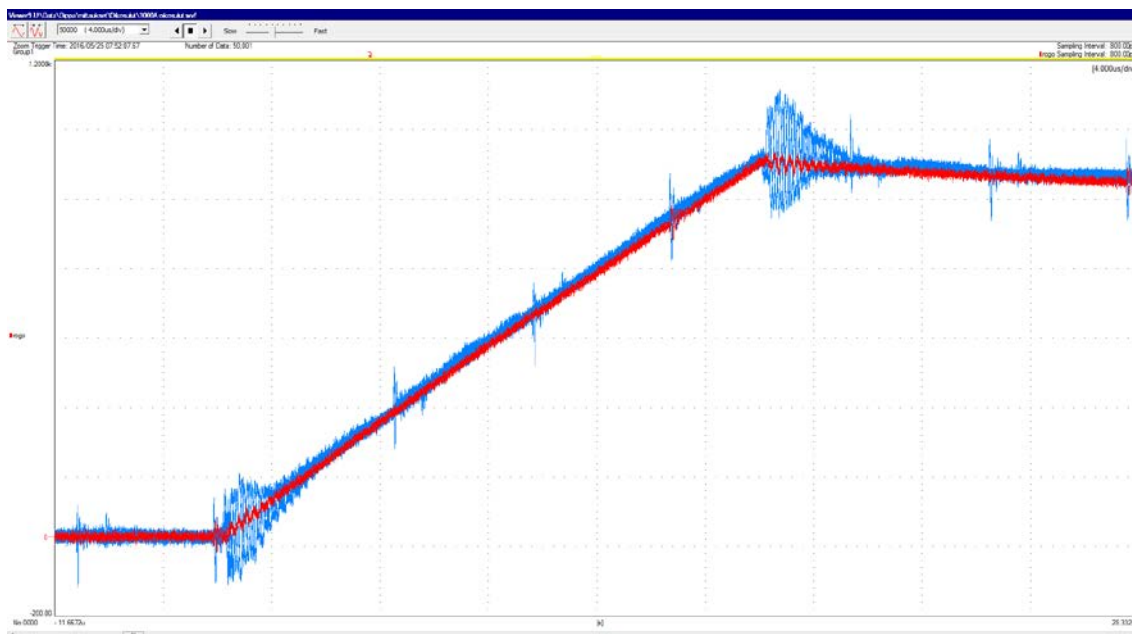
Kuva B.4: - 6 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat CLCE-01 virta-anturien mittaamat virrat. Laskevan reunan pituus on 45 μ s.



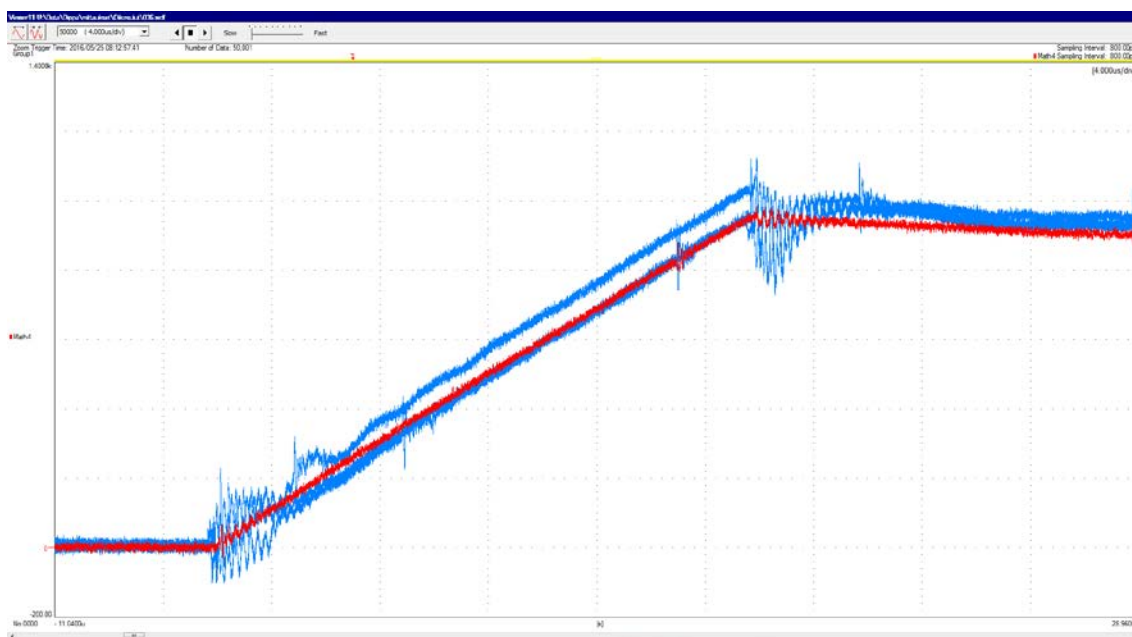
Kuva B.5: - 1 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat kompensoitujen Hall-anturien mittaamat virrat. Laskevan reunan pituus on 20 μ s.



Kuva B.6: - 1 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat CLCE-01 virta-anturien mittaamat virrat. Laskevan reunan pituus on 20 μ s.



Kuva B.7: + 1 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat kompensoitujen Hall-anturien mittaamat virrat. Nousevan reunan pituus on 20 μ s.



Kuva B.8: + 1 kA virtapulssi. Punainen käyrä on Rogowski-kelan mittaama virta ja kolme sinistä käyrää sen takana ovat CLCE-01 virta-anturien mittaamat virrat. Nousevan reunan pituus on 20 μ s.